

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

Katarina Prusina

IZBOJ S DIELEKTRIČNOM BARIJEROM

Diplomski rad

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ  
FIZIKA I INFORMATIKA; SMJER NASTAVNIČKI

**Katarina Prusina**

Diplomski rad

# **Izboj s dielektričnom barijerom**

Voditelj diplomskog rada: prof. dr. sc. Damir Veža

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo: 1. \_\_\_\_\_

2. \_\_\_\_\_

3. \_\_\_\_\_

Datum polaganja: \_\_\_\_\_

Zagreb, 2018.

Zahvaljujem se mentoru, prof. dr. sc. Damiru Veži na pruženoj pomoći, savjetima i strpljenju pri izradi ovog diplomskog rada.

Također, zahvaljujem se svojim prijateljima koji su mi uljepšali studentske dane.

Posebnu zahvalnost iskazujem svojoj obitelji i Josipu na razumijevanju i moralnoj podršci.

## Sažetak

U ovom diplomskom radu promatramo izboj s dielektričnom barijerom te različite načine njegove primjene u industriji. Posebnost ove vrste izboja je lakoća rada pri atmosferskom tlaku te kombiniranje korisnih svojstava netermalne plazme. Jedna od velikih prednosti izboja s dielektričnom barijerom je laka promjena dimenzija- pri-godan je za rad u malim laboratorijskim reaktorima, no i u velikim industrijskim instalacijama. Industrijske primjene su stvaranje ozona, kontrola onečišćenja, modi-fikacija površine, CO<sub>2</sub> laseri, ekscimerske lampe, plazma ekrani. Ovisno o primjeni i uvjetima rada izboj može imati vlaknastu strukturu ili raspršen izgled. U ovom radu detaljno je opisana povijest izboja u plinovima, fizičke osnove i svojstva standardnog i izboja s dielektričnom barijerom te moguće primjene.

Ključne riječi: izboj s dielektričnom barijerom, tihi izboj, stvaranje ozona, plazma ekrani

# Dielectric barrier discharge

## **Abstract**

We examine dielectric barrier discharge and its use on a large industrial scale. A prominent feature is the ease of atmospheric-pressure operation and the use of non-equilibrium plasma properties. One of the great advantages is simple scalability from small laboratory reactors to large industrial installations. Industrial applications include ozone generation, pollution control, surface treatment, high power CO<sub>2</sub> lasers, ultraviolet excimer lamps and flat large-area plasma displays. Depending on the application and the operating conditions the discharge can have pronounced filamentary structure or fairly diffuse appearance. History, discharge physics and their applications are discussed in detail.

Keywords: dielectric- barrier discharge, silent discharge, ozone generation, plasma displays

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Povijest izboja u plinovima</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Fizičke osnove i svojstva izboja</b>	<b>5</b>
3.1	Fizičke osnove i svojstva standardnog izboja . . . . .	5
3.2	Fizičke osnove i svojstva izboja s dielektričnom barijerom . . . . .	10
3.2.1	Fenomen proboja i formacija mikroizboja . . . . .	11
3.2.2	Kemija plazme mikroizboja . . . . .	14
3.2.3	Numeričko modeliranje . . . . .	15
3.2.4	Općeniti parametri izboja . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Primjena izboja s dielektričnom barijerom</b>	<b>18</b>
4.1	Dobivanje ozona . . . . .	18
4.1.1	Kinetika generacije ozona iz kisika ili zraka . . . . .	19
4.1.2	Tehnički aspekti industrijske proizvodnje ozona . . . . .	21
4.1.3	Priprema plina . . . . .	23
4.2	Pročišćavanje zraka . . . . .	24
4.2.1	Sanacija otrovnih plinova pomoću plazme . . . . .	24
4.2.2	Tretman lako isparivih organskih spojeva . . . . .	25
4.2.3	Tretman ispušnih plinova dizelskog motora . . . . .	26
4.3	Modifikacije površine . . . . .	27
4.4	Plazma ekrani . . . . .	29
4.5	$CO_2$ laser . . . . .	30
4.6	Plazma u medicini . . . . .	31
<b>5</b>	<b>Demonstracijski eksperiment</b>	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>Metodički dio</b>	<b>36</b>
6.1	Priprema za nastavni sat: Kapacitet kondenzatora . . . . .	37
6.1.1	Uvodni dio . . . . .	38
6.1.2	Središnji dio . . . . .	39
6.1.3	Završni dio . . . . .	45

<b>7 Zaključak</b>	<b>47</b>
<b>Literatura</b>	<b>48</b>

# 1 Uvod

Izboj s dielektričnom barijerom (DBD – eng. Dielectric – barrier discharge ) pri atmosferskom tlaku raširen je u različitim znanstvenim poljima i koristi se u razne svrhe. Lista prednosti je dugačka, no glavni razlozi za to su njegov jednostavan postav, mala potrošnja energije, rad pri različitim tlakovima, stabilnost pa prema tome i sposobnost dugoročnog rada. Osim industrijske primjene za tretiranje površina ili premazivanje, medicinske primjene ili analitički pristup, izboj s dielektričnom barijerom nudi razne prednosti za temeljne studije. Njegov jednostavan i stabilan rad idealan je za slučajeve kada je potreban sistem koji se neće znatno mijenjati tijekom dugog vremenskog perioda. Iz tog razloga idealan je za istraživanje mehanizama pobuđenja i ionizacije sistema plemenitih plinova pri atmosferskom tlaku.

Ovaj diplomski rad organiziran je u šest poglavlja.

Nakon uvoda, u drugom poglavlju dan je povijesni slijed proučavanja izboja u plinovima.

U trećem poglavlju opisane su fizičke osnove i svojstva standardnog izboja te fizičke osnove i svojstva izboja s dielektričnom barijerom. Tri su glavne vrste samostalnog izboja: tamni, tinjajući i lučni. Važni procesi za održavanje izboja su: ionizacija atoma u sudaru s elektronom, fotoionizacija, pobuđivanje atoma u sudaru s elektronom, pobuđivanje fotonima, neelastični sudari s metastabilnim atomima, raspad pobuđenog stanja praćen emisijom fotona, rekombinacija elektrona i atomskog iona te rekombinacija elektrona i molekulskog iona. Kako bi došlo do proboja u plinu i do vođenja struje u izboju s dielektričnom barijerom električno polje mora biti dovoljno veliko. Detaljno je opisan fenomen proboja te formacija i kemija plazme mikroizboja. Četvrto poglavlje posvećeno je primjenama izboja s dielektričnom barijerom: dobivanje ozona, pročišćavanje zraka, modifikacija površine, plazma ekrani, CO<sub>2</sub> laser, korištenje plazme u medicini.

U petom poglavlju opisan je demonstracijski eksperiment u kojem se koristio kapilarni izboj s dielektričnom barijerom te se pokazalo da je dušik glavni izvor pozitivnih iona u izboju s dielektričnom barijerom u heliju pri atmosferskom tlaku. Šesto poglavlje posvećeno je metodičkom dijelu koji opisuje način na koji, u srednjoj školi, temu kapacitet kondenzatora možemo uvesti pomoću istraživački usmjerene nastave.



## 2 Povijest izboja u plinovima

Grčki filozof Tales iz Mileta (640. ili 624. pr. Kr. – oko 547. pr. Kr.) opazio je da se jantar može naelektrizirati trljanjem tkaninom, pa privući druge objekte i proizvesti iskre. Tijekom 17. i 18. stoljeća ovo znanje se nanovo otkrilo te istraživanjima dodatno proširilo [2]. Rani razvoj fizike plazme ili uže, fizike izboja usko je povezan uz razvoj odgovarajućih izvora električne energije. Svaki napredak je doveo do otkrića novih fenomena, no uvijek je postojao veliki raskorak između početnog opažanja i razumijevanja. 1671. Gottfried Wilhelm Leibniz je otkio da su iskre povezane sa električnim fenomenima. 1672. godine Otto von Guericke opazio je pojavu elektrostatskih iskri koje se pojavljuju pri trljanju sumpornih lopti rukom. Tri godine kasnije astronom Jean Picard primijetio je da živin barometar svijetli kad ga se protrese. Oko 1698. godine grof Charles Francois de Cisternay du Fay provodio je intenzivna istraživanja nad trljanim jantarom. Istraživanja Johanna Heinricha Winklera u Leipzigu, koji je koristio Picardova opažanja iz 1745. godine, važna su zato što su u 20. stoljeću korištena u razvoju fluorescentnih cijevi. Istraživanja su se nastavila te su 1802. skoro istovremeno, no u nezavisnim istraživanjima Vasili Petrov u St. Petersburgu i Sir Humphry Davy u Londonu realizirali električni luk između dvije ugljikove elektrode. Za svoje eksperimente oba znanstvenika su koristila kemijske baterije koje je izumio barun Alessandro Volta 1799. godine. Izum ugljikove lampe, koja je radila na principu električnog luka, ipak se pripisuje Davyju. Svoj izum je 1807. godine predstavio Kraljevskom institutu Velike Britanije i osnovao fiziku lukova kao novo područje istraživanja [1].

Benjamin Franklin je 1750. godine objavio prijedlog za eksperiment kojim bi pokazao da je munja elektricitet. Svojim istraživanjima doveo je do uvođenja pojmova pozitivnog i negativnog naboja koji postoje i danas, te do izuma gromobrana. Mikhail V. Lomonossov je 1743. iznio svoje mišljenje da su munja i polarna svjetlost fenomen atmosferskog izboja. Obojica su bila u pravu s obzirom na sličnosti munje i iskri, no nisu mogli znati za velike razlike između izboja polarne svjetlosti i izboja iskri. Charles – Augustin de Coulomb je 1785. otkrio tamni izboj u kojem je plin ioniziran pomoću korištenja ultraljubičaste svjetlosti.

Tijekom 19. stoljeća interes za izboj u plinovima je porastao. To se dogodilo zbog istraživanja fizike elektromagnetskih fenomena koje su uveli Michael Faraday i James

Clerk Maxwell. Faraday je eksperimentirao s iskrama i tinjajućim izbojima te na taj način otkrio ovisnost izboja o tlaku u cijevi. Takva su istraživanja bila moguća zbog poboljšanih tehnika puhanja stakla i odvajanja plinova.

Svojim istraživanjem na razrijeđenim plinovima Johann Hittorff je odredio električnu vodljivost zraka te još nekih plinova, a to je dovelo do formule za električnu vodljivost u plinu koju je osmislio Paul Drude te uveo koncept frekvencije sudara  $v_c$ <sup>1</sup>. Hittorff je kasnije objavio prvo istraživanje izvedeno na katodnim zrakama koje je bilo presudno za kasniju formulaciju atomske fizike. Tek nakon razvoja atomske fizike moglo je doći do bilo kakvog dubljeg razumijevanja izboja u plinovima. William Crookes otkrio je kako dolazi do pojave otklanjanja katodnih zraka u magnetnom polju te ih nazvao četvrtim stanjem tvari. Tvrdio je da bi daljnje istraživanje dovelo do dubokog uvida u prirodu tvari. Sir Joseph Thomson je odredio omjer elementarnog naboja i mase, koji je doveo do otkrića elektrona, na temelju elektrodinamike gibanja nabijenih čestica u elektromagnetskim poljima te iz otklanjanja katodnih zraka u magnetnom polju. Godinu dana kasnije Wilhelm Conrad Roentgen je pomoću eksperimentiranja s katodnim zrakama otkrio zrake koje su kasnije dobile njegovo ime.

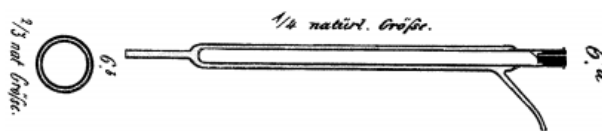
Kraj 19. i početkom 20. stoljeća bio je posvećen istraživanju spektra uz korištenje cijevi s razrijeđenim plinovima. To je dovelo do određivanja Balmerove, Ritzove, Lymanove i Paschenove spektralne serije, do preciznog određivanja ovisnosti zračenja crnog tijela o temperaturi te do energije pobuđenja elektrona u atomima na određenim energijama koje su otkrili James Franck i Gustav Hertz 1914. Ova istraživanja dovela su do formulacije kvantne i atomske teorije te ujedno razvoja fizike izboja u plinovima. Stoga ne čudi što je većina dobitnika Nobelove nagrade u prva tri desetljeća 20. stoljeća radila na fizici izboja u plinovima. Neki od njih su Rutherford, John S. Townsend, Owen W. Richardson, Karl Compton, Irving Langmuir i Peter Debye. Pogotovo su otkiće Townsenda i Richardsona o različitim tipovima izboja bila ključna za dalje razvijanje fizike izboja u plinovima [1].

Godine 1857. njemački izumitelj Werner von Siemens je započeo eksperimentalna istraživanja fokusirana na stvaranje ozona. Tok zraka ili kisika u uskoj pukotini između dvije koaksijalne staklene cijevi su izložili utjecaju izboja s dielektričnom barijerom

---

<sup>1</sup>Frekvencija sudara dobila je svoje fizikalno objašnjenje kad je Ernest Rutherford otkrio sada već poznati Rutherfordov udarni poprečni presjek  $\sigma_c$ . Tada se frekvencija sudara mogla napisati kao  $v_c = n\sigma_c v$ , gdje je  $n$  gustoća plina, a  $v$  brzina čestice. Na isti način ovo je dovelo do uvođenja udaljenosti između dva sudara koju prijeđe čestica bez ijednog sudara  $\lambda_{ff} = v/v_c$ . Kada je  $v$  postala termička brzina to je dovelo do raspisa  $\lambda_{mfp} = v_{th}/v_c = 1/n\sigma_c$

koji je održavalo izmjenično električno polje dovoljno velike amplitude. Ovakva vrsta izboja imala je novo svojstvo - elektrode su bile postavljene izvan prostora u kojoj se događao izboj i nisu bile u kontaktu sa plazmom.



Slika 2.1: W. Siemensova cijev za stvaranje ozona pomoću izboja ( [4], natürl. Grösse znači u prirodnoj veličini)

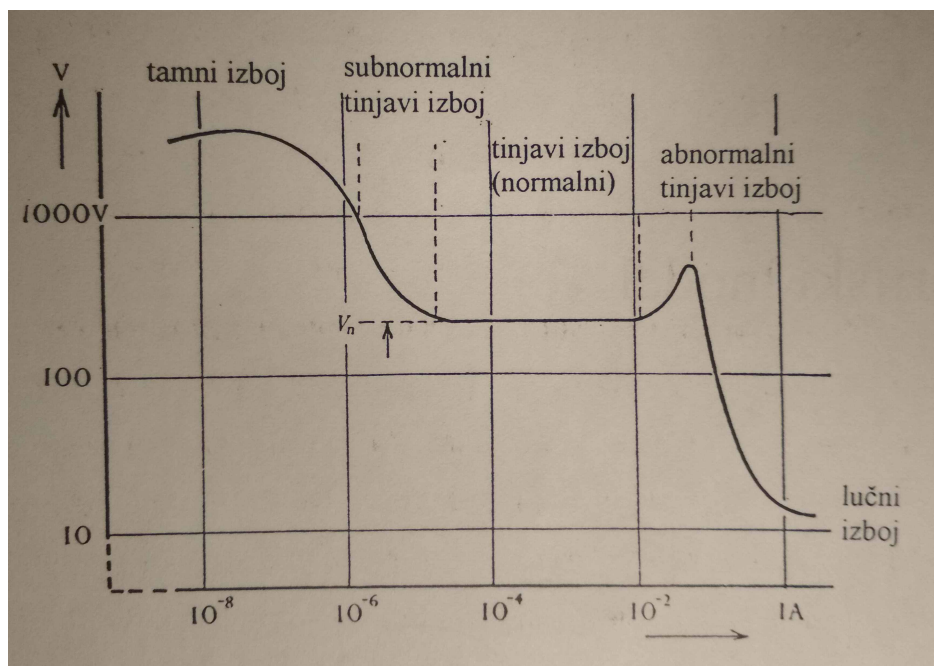
Siemens nije jedini koji je pokazao interes za izboj s dielektričnom barijerom (eng. DBD - dielectric barrier discharge). Andrews i Tait su 1860. godine predložili naziv tihi izboj koji se još koristi u engleskoj (silent discharge) , njemačkoj (stille Entladung) i francuskoj (décharge silencieuse) znanstvenoj literaturi. Desetljećima se istraživalo stvaranje ozona i dušikovog oksida pomoću izboja s dielektričnom barijerom. Početkom dvadesetog stoljeća Emil Wardburg izvodio je opsežna istraživanja vezana za prirodu tihog izboja. U Njemačkoj je ovu vrstu izboja istraživao Becker , a u Francuskoj Otto te su došli do otkrića koja su dovela do unaprjeđenja uređaja koji su koristili tihi izboj za generaciju ozona. Električni inženjer K. Buss je svojim radom napravio veliki korak u karakteriziranju izboja te je došao do prvih fotografskih tragova (Lichtenbergove figure) mikroizboja koji se događaju pri atmosferskom tlaku u zraku između planparalelnih ploča prekrivenih s dielektrikom. Uz to je napravio osciloskopske snimke struje i napona. 1943. T. C. Manley predložio je korištenje zatvorenih Lissajousovih krivulja, kojima bi se dobio uvid u raspršenu snagu u izboju s dielektričnom barijerom i izveo je jednadžbu koja je postala poznata kao formula za snagu ozonizatora. Buss je otkrio da se proboj zraka pri atmosferskom tlaku uvijek događa preko velikog broja sitnih kratkotrajnih strujnih vlakana. Priroda ovih vlakana zanimala je mnoge te su ih istraživali Klemenc, Suzuki, Honda i Naito, a kasnije Gorbrecht te Bagirov i njegovi suradnici. Briner i Susz u Švicarskoj, Phillipov i njegova skupina u Rusiji, Devins u Sjedinjenim Američkim Državama, Lunt u Engleskoj i Fuji u Japanu su se bavili daljnjim istraživanjem stvaranja ozona u ovoj vrsti izboja. Generacija ozona bila je glavna industrijska primjena izboja s dielektričnom barijerom i većinom se koristila za obradu vode. Baš zato se on nekada naziva „izboj

ozonizator“ . Oko 1970. godine za istraživanja se počela koristiti moderna dijagnostika te moderni alati. Iako je glavni cilj bio razumijevanje kemijskih i fizikalnih procesa plazme u ozonizatorima , ova istraživanja dovela su do mnogobrojnih dodatnih primjena izboja s dielektričnom barijerom : modifikacije površine, kontrola zagađenja, laser s ugljikovim dioksidom koji koristi izboj s dielektričnom barijerom te najnovije, velikih plazma ekrana. Ove nove primjene izboja s dielektričnom barijerom u tom trenutku nadmašile su primjenu DBD-a u ozonizatorima. Plazma ekrani su vrhunac svoje popularnosti stekli krajem 90ih godina prošlog stoljeća te su imali puno prednosti pred LCD ekranima. Danas se potražnja za plazma ekranima znatno smanjila te su veće tvrtke poput Panasonic, Samsunga i LG- a prekinule njihovu proizvodnju 2014 [4].

### **3 Fizičke osnove i svojstva izboja**

#### ***3.1 Fizičke osnove i svojstva standardnog izboja***

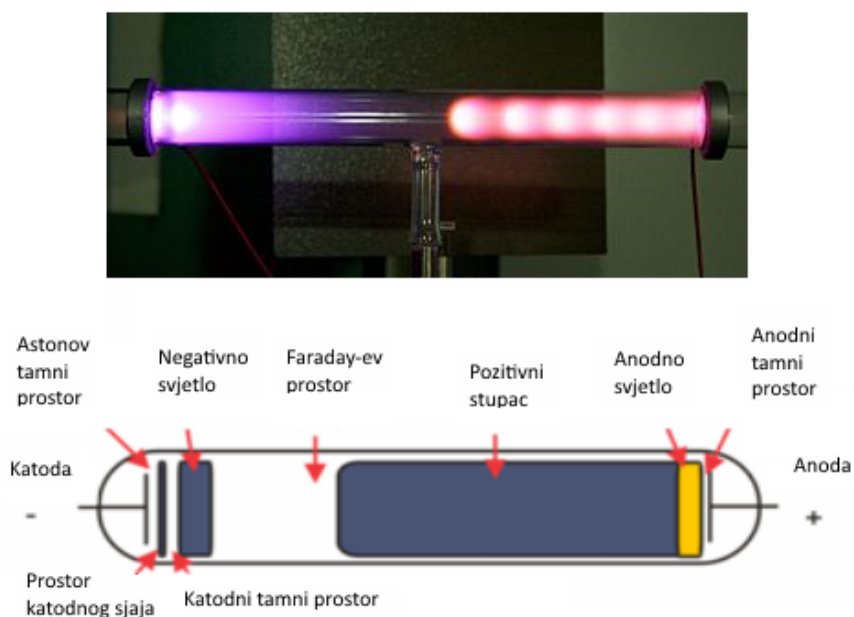
Električni izboj je oslobađanje i prijenos elektriciteta u električnom polju kroz plin. Izboj se sastoji od elektrona, iona, neutralnih atoma i molekula, fotona, te predstavlja sistem u kojem se mogu proučavati različiti atomski i molekularni procesi te uvjeti pri kojima se događaju. Električni izboj se javlja ako se na elektrode cijevi ispunjene plinom ili parom metala narine dovoljno visok napon. Zbog djelovanja kozmičkog zračenja, svaki plin je djelomično ioniziran. Iz tog razloga primarni nosioci naboja u električnom polju, na putu prema odgovarajućim elektrodama, dobivaju dovoljno energije da sudarima mogu stvarati nove nabijene čestice i proizvesti električni izboj. Izboj se može održavati samostalno kada je električno polje dovoljno tako da svaki primarni elektron u prosjeku stvori bar jedan novi. Nesamostalan je ako je potrebno vanjskim izvorom nadoknađivati gubitak naboja zbog rekombinacije u plinu i odvođenja nabijenih čestica na elektrode. Osim o naponu, osobine izboja ovise o vrsti i tlaku plina, obliku i položaju elektroda, te veličini i obliku cijevi. Niskotlačnim izbojem smatra se izboj u plinu pri tlaku od stotinjak Paskala. Pri niskom tlaku lakše je postići uniforman izboj. Tri su glavne vrste samostalnog izboja: tamni, tinjajući i lučni izboj.



Slika 3.1: Postoje tri glavne vrste samostalnog izboja: tamni, tinjavi i lučni izboj (Preuzeto iz [3]).

U tamnom izboju plin je ioniziran pomoću ultraljubičaste svjetlosti ili kozmičkih zraka. Pri većem naponu, oslobođeni nosioci naboja mogu dobiti dovoljno energije kako bi oslobodili dodatne nosioce tijekom sudara u procesu kojeg nazivamo "Townsendova lavina". To je proces ionizacije plina u kojem električno polje ubrzava slobodne elektrone te se oni sudaraju s molekulama plina i dodatnim slobodnim elektronima. To dovodi do ubrzavanja i dodatnih elektrona te se proces nastavlja na isti način. Naziv je dobio po Johnu Sealy Townsendu koji je otkrio osnovni mehanizam ionizacije krajem 19. stoljeća.

Ako je gustoća struje niskotlačnog izboja oko  $10^{-6}$  do  $10^{-1}$  mA/cm<sup>2</sup> izboj se naziva tinjavi izboj (Slika 3.1). Tinjavi izboj je prepoznatljiv po nizu tamnih i svijetlih prostora između elektroda. Neposredno uz katodu nalazi se Astonov tamni prostor. U njemu se nalaze elektroni niskih energija koje uglavnom pozitivni ioni izbijaju iz katode. Elektroni napuštaju katodu s energijama od oko 1eV koje nisu dovoljne za ionizaciju ili pobuđivanje atoma plina. U prostoru katodnog sjaja elektroni imaju kinetičku energiju s kojom je djelotvornost pobuđivanja atoma maksimalna, te iz tog razloga ovaj prostor svijetli. Elektroni dobivaju više energije te ioniziraju atome. Pobuđeni atomi brzo se vraćaju u osnovno stanje i emitiraju svjetlo, no kada su ionizirani dolazi do preraspodjele naboja. Iz tog razloga ne dolazi do svjetla te ovaj prostor nazivamo katodnim tamnim prostorom. Negativno svjetlo je najsvjetliji dio



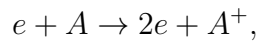
Slika 3.2: Na Crookesovoj cijevi vidimo različita područja tinjavog izboja te dijagram s njihovim imenima.

izboja. Tu dolaze elektroni nastali u katodnom tamnom prostoru energija dovoljnih za pobuđivanje atoma u najniže pobuđeno stanje, te manji broj elektrona koji se do tada još nisu sudarili. Elektroni gube energiju sudarima i nastavljaju s gibanjem. Intenzitet svjetlosti prema izlasku iz područja slabi, a granica sa sljedećim područjem je difuzna. Zbog učestale rekombinacije, gustoća naboja pada. Električno polje je slabo. U Faradayevom prostoru električno polje je nešto jače. U njemu elektroni nemaju dovoljno energije za pobuđivanje atoma, ali se zbog postojanja električnog polja opet ubzavaju. Anodna zona započinje s pozitivnim stupcem. Energija elektrona je dovoljno velika za pobuđivanje i za ionizaciju atoma. Ukupni naboj u ovom prostoru je jednak nuli. Širina stupca se povećava povećanjem razmaka elektroda i povećanjem tlaka plina. U anodnom tamnom prostoru elektronima raste kinetička energija. Neposredno uz anodu nalazi se anodno svjetlo. Energija elektrona u anodnom svjetlu dovoljna je za ionizaciju, a zbog viška nakupljenih elektrona električno polje je poraslo.

U izboju se događaju različiti atomski i molekularni procesi. Dok su neki procesi nužni za postojanje izboja, drugi se događaju ovisno o uvjetima u njemu. Elastični sudari elektrona i atoma su jedini elastični sudari u izboju. Tim sudarima samo se otklanja-

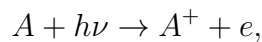
nju elektroni s putanje usmjerene direktno prema anodi, ali se energije čestica bitnije ne mijenjaju. Za održavanje izboja važni su procesi:

- ionizacija atoma u sudaru s elektronom



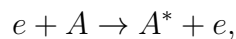
gdje je A atom, a  $A^+$  ionizirani atom,

- fotoionizacija



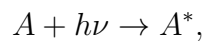
gdje je  $h\nu$  energija fotona, h Planckova konstanta, a  $\nu$  frekvencija fotona,

- pobuđivanje atoma u sudaru s elektronom



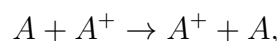
gdje je  $A^*$  atom u pobuđenom stanju,

- pobuđivanje fotonima

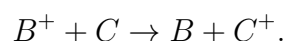


- neelastični sudari čestica s metastabilnim atomima,
- raspad pobuđenog stanja praćen emisijom fotona,
- rekombinacija elektrona i atomskog iona,
- rekombinacija elektrona i molekulskog iona.

Manje važni procesi u plazmi su elastični i neelastični sudari iona i neutrala. U neelastičnim sudarima iona i neutrala jednoatomskog plina dolazi do izmjene naboja simetričnom izmjenom



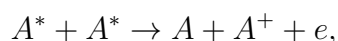
a asimetričnom izmjenom, izmjenjuje se naboj između atoma koji čine molekule u dvoatomskom plinu :



Ovi su procesi važni u prostorima uz katodu jer mijenjaju energetska raspodjelu iona i neutrala. Ionizacija neutralnog atoma primjese u plinu može nastati sudarom s metastabilnim atomom ako je ionizacijska energija primjesnog atoma manja od energije metastabilnog atoma i naziva se Penningova ionizacija



gdje je G primjesni atom. Penningova ionizacija je tip kemi - ionizacije <sup>2</sup>, ionizacijski proces koji uključuje reakcije između neutralnih atoma ili molekula. Proces je dobio ime po nizozemskom fizičaru Fransu Michaelu Penningu koji je ga je prvi uočio 1927. Sudarom dva metastabila atoma



te sudarom elektrona i metastabilnog atoma



također može doći do ionizacije. U niskotlačnom izboju ionizacija pobuđenih atoma sudarom s atomima u osnovno stanju ili sudarom s atomima stijenke cijevi (termalna aktivacija) može se zanemariti [3].

U lučnom izboju elektroni napuštaju katodu zbog termoelektronske emisije. Struja kroz sredstvo koje inače nije vodljivo, poput zraka, stvara plazmu koja rezultira vidljivom svjetlošću. Za lučni izboj karakterističan je napon niži od napona u slučaju tinjajućeg izboja. Ovakva vrsta izboja oslanja se na termoelektronsku emisiju elektrona iz elektroda. Termoelektronska emisija je odašiljanje elektrona iz metala, uz ionizaciju atoma, uzrokovana dotokom toplinske energije. Krajem 19. stoljeća lučno svjetlo koristilo se za javnu rasvjetu, a s vremenom je došlo do raznih primjena poput lampi s ksenonom na principu električnog luka koje su se koristile za projekcije filмова, fluorescentnih cijevi i lampi sa živom ili natrijem. Lučni izboj je tip električnog izboja s najvećom gustoćom struje. Pojavu luka između elektroda može pokrenuti

---

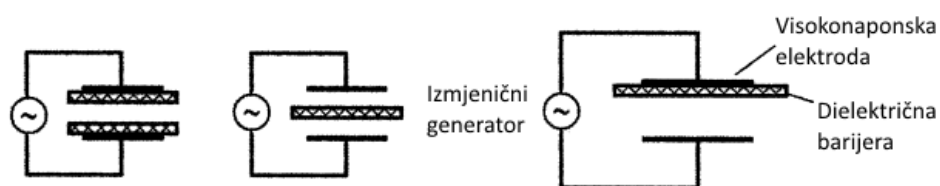
<sup>2</sup>Kemi- ionizacija (eng. chemi – ionisation) označava stvaranje iona kroz reakciju atoma ili molekule s atomom ili molekulom u pobuđenom stanju tijekom stvaranja novih veza. Koristi se u masenoj spektrometriji jer stvara jedinstvene veze koje se mogu iskoristiti za prepoznavanje molekula. Ovaj proces je jako čest u prirodi, smatra se da je početna reakcija u plamenu.



ionizacija i tinjajući izboj u slučaju kad je došlo do povećanja struje kroz elektrode. Luk u plinovima pri atmosferskom tlaku prepoznajemo po vidljivoj emisiji svjetla, velikoj gustoći struje i visokoj temperaturi. Lučni izboj razlikujemo od tinjajućeg dijelom zbog približno jednake temperature elektrona i pozitivnih iona, no u tinjajućem izboju termalna energija iona je znatno manja od termalne energije elektrona.

### 3.2 Fizičke osnove i svojstva izboja s dielektričnom barijerom

Dielektrik je izolator te ne može provesti istosmjernu struju. Njegova dielektrična konstanta i debljina u kombinaciji s vremenskom derivacijom napona određuju količinu struje pomaka koja može proći kroz dielektrik. Kako bi došlo do vođenja struje električno polje mora biti dovoljno veliko kako bi uzrokovalo proboj u plinu. U većini primjena dielektrik ograničava prosječnu gustoću struje u prostoru u kojem se plin nalazi. Materijali najbolji za izboj s dielektričnom barijerom su staklo ili kvarc, a u specijalnim slučajevima keramički materijali i tanki sloj emajla ili plastike. U nekim primjenama u svrhu zaštite nanose se dodatni slojevi materijala s dielektričnim svojstvima. Na visokim frekvencijama trenutna ograničenja dielektrika postaju manje efektivna. Iz tog razloga izboj s dielektričnom barijerom normalno radi do frekvencija od 10 MHz. Kada je električno polje u prostoru izboja dovoljno veliko da uzrokuje proboj, u većini plinova može se uočiti puno mikroizboja. Preferirani tlak za generaciju ozona, a tako i za kontrolu onečišćenja je reda veličine  $10^5$ . U tom trenutku formacije plazme rezultira vođenjem struje, no ograničeno je s mikroizbojima. Plin koji se nalazi između mikroizboja nije ioniziran. Njegova svrha je upijanje rasipane energije koja je nastala zbog mikroizboja i skupljanje i transportiranje dugotrajnijih čestica. U primjenama s najvećom snagom koristi se tekuće hlađenje bar jedne od korištenih elektroda. Osim planarnih konfiguracija koriste se i kružne cijevi za izboj s dielektričnom barijerom. Širina praznine između elektroda u kojoj se događa izboj



Slika 3.3: Osnovna konfiguracija izboja s dielektričnom barijerom

može biti manja od 0.1 mm, no ovisno o primjeni iznositi i nekoliko centimetara. U takvoj praznini ispunjenoj s plinom pri atmosferskom tlaku, kako bi se potaknuo izboj, koriste se naponi od nekoliko stotina V do nekoliko kV. Plin može protjecati (stvaranje ozona, kontrola onečišćenja ), kružiti (laseri s ugljikovim dioksidom ) ili biti potpuno zatvoren (plazma ekrani ,...) u postavu za izboj s dielektričnom barijerom [4].

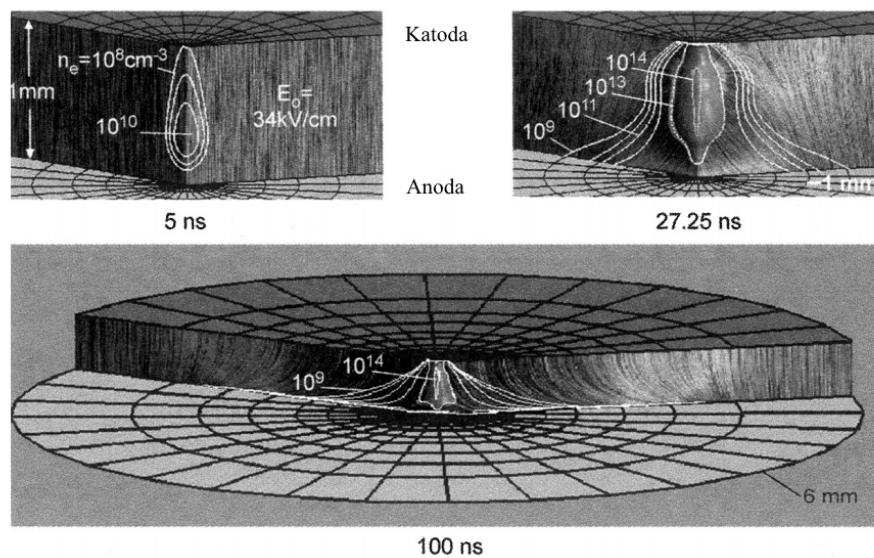
### 3.2.1 Fenomen proboja i formacija mikroizboja

Pri atmosferskom tlaku električni proboj u velikom broju mikroizboja je normalna pojava za većinu plinova u konfiguraciji izboja s dielektričnom barijerom. Pri nekim okolnostima mogu se dobiti i naizgled homogeni, raspršeni proboj ili ravnomjerno raspoređeni uzorci plazme. Takvi fenomeni lako se dobiju u čistom heliju, plinu bogatom helijem ili sa specijalno konfiguriranim elektrodama i načinom rada u drugim plinovima. Pri niskom tlaku, tipično ispod 100 Pa, uvijek se može dobiti raspršena plazma. Takvi izboji uobičajeno se nazivaju RF tinjajući izboji i široko su rasprostranjeni u industriji poluvodiča za gravuru i taloženje iz plazme. Ti niskotlačni izboji imaju drugačija svojstva. Izboj s dielektričnom barijerom se najčešće pojavljuje pri povišenom tlaku. Karakterizira ga veliki broj kratkotrajnih mikroizboja. Svaki mikroizboj ima skoro cilindričan plazma kanal, tipično oko 100  $\mu\text{m}$  i širi se u izboj veće površine. Izvođena su razna istraživanja kako bi se razumjela fizika mikroizboja, te danas znamo više o karakteristikama jednog mikroizbojnog vlakna [7]:

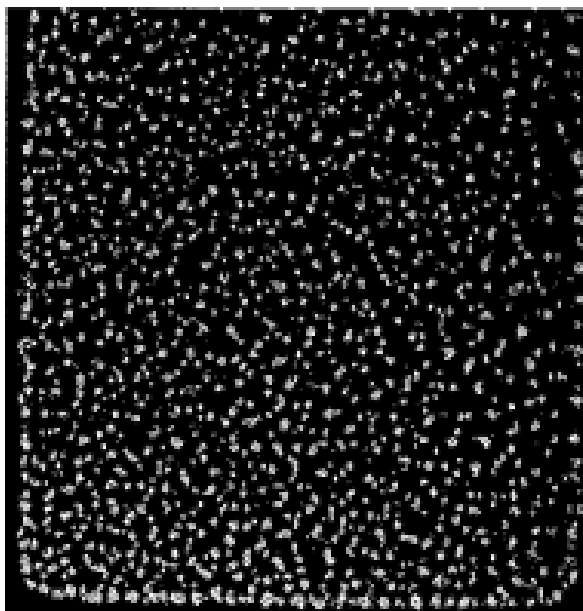
Trajanje	1- 10 ns
Radijus vlakna	$\approx 0.1\text{mm}$
Maksimalna struja	0.1 mA
Gustoća struje	100 – 1000 mA/ $\text{cm}^2$
Gustoća elektrona	$10^{14}\text{- }10^{15} \text{ cm}^{-3}$
Energija elektrona	1 - 10 eV

Kako bi potakli proboj u praznini između elektroda električno polje mora biti veće od minimalnog polja potrebnog za proboj. U ekvivalentnom strujnom krugu to odgovara otvaranju i zatvaranju strujnog kruga pomoću prekidača. Na taj način pokrećemo struju kroz nit plazme čiji se otpor  $R(t)$  brzo mijenja u vremenu.

U stvarnosti rastuće lavine atoma brzo dovode do stvaranja nakupine naboja u prostoru te zbog toga nastaju trake samostalnog širenja. Povećanje polja koje je



Slika 3.4: Dvodomenzionalna simulacija razvoja mikroizboja u smjesi 80%  $H_2$  i 20%  $CO_2$  (Preuzeto iz [4]).



Slika 3.5: Tragovi koje su individualni mikroizboji ostavili na fotografskom papiru. Preuzeto iz [4].

potaknula nakupina naboja na čelu trake, kreće se većom brzinom od brzine strujanja elektrona, okreće se kod anode i putuje natrag do katode gdje se u vremenu od 1ns stvara jako tanak sloj na katodi. U ovom trenutku struja kroz vodljivi kanal između elektroda doseže svoj vrhunac. Nakon toga gomilanje naboja na površini dielektrika smanjuje lokalno električno polje u tolikoj mjeri da ionizacija prestaje u nekoliko nanosekundi i mikroizboj je ugušen (Slika 3.4). Gušenje mikroizboja je naglašenije u elektronegativnim plinovima zbog brzog vezanja elektrona. Iako je možda neočekivano, za različite plinove pri atmosferskom tlaku dostižu se iste vrijednosti gustoće elektrona ( od  $10^{14}$  do  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  ) i gustoće struje ( od 100 do 1000  $\text{Acm}^{-2}$  ) [4]. Katodni sloj s ekstremno velikim električnim poljem doseže samo do  $10 \text{ }\mu\text{m}$  u prazninu. Već spomenuto gušenje mikroizboja koje se događa zbog smanjenja električnog polja ovisi o povećanju površine izboja, svojstvima dielektrične barijere i svojstvima plina. Za izolirani mikroizboj, površina izboja je puno veća od promjera kanala. Proširenje površine izboja određuje vezanje kapaciteta preko dielektrične barijere i područje smanjenog polja nakon gušenja mikroizboja. Izvan tog područja utjecaja još uvijek imamo neometane uvjete velikog polja dostignute u trenutku proboja. Sve dok vanjski napon raste, sljedeći mikroizboj će se dogoditi na drugom mjestu. Dielektrik ima dvije svrhe – ograničava količinu naboja i energiju danu svakom individualnom mikroizboju, a u isto vrijeme raspoređuje mikronaboje po cijeloj praznini između elektroda. Netaknut dielektrik garantira da neće doći do iskre u praznini između elektroda. Individualni mikroizboj tipično nosi naboj reda veličine 100 pC, a tipična energija je  $\mu\text{J}$ . Lokalni efekt grijanja kratke struje je malen, u zraku u uskoj praznini između elektroda tipično iznosi oko  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ . U istraživanjima izboja s dielektričnom barijerom većinom se pomoću posebnih svojstava plina, prilagođavanja tlaka i temperature te optimiziranja geometrije elektroda i svojstava dielektrika kroje mikroizboji sa željenim karakteristikama. Radijus širenja toka elektrona ovisi o gustoći plina te o ionizacijskim svojstvima plina. Proporcionalan je recipročnoj vrijednosti produkta gustoće plina i koeficijentu derivacije efektivne ionizacije po smanjenom električnom polju u probou. U većini plinova do proboja dolazi pri 100-200 Td (1 Td „Townsend“ odgovara  $10^{-17} \text{ Vcm}^{-2}$ ). Radijus širenja kanala u nekim plinovima može se pokazati na sljedeći način:

kisik < ugljikov dioksid < zrak < dušik < ksenon < helij.

Rašireni izboj može se dobiti ako tijekom proboja postoji dovoljan broj preklapa-

nja simultano širenih lavina elektrona. U heliju se ovaj uvjet najlakše postiže zbog njegovih relativno širokih kanala. Ukupan naboj  $Q$  prenesen u mikroizboju ovisi o svojstima plina i na njega može utjecati širina praznine i svojstva dielektrika. Ukupan naboj je proporcionalan širini praznine između elektrioda  $d$ , količini  $\epsilon/g$  (relativna permitivnost, debljina dielektrika). Ova relacija je eksperimentalno provjerena i vrijedi za vrijednosti  $\epsilon$  do 1000. Iako je možda bilo za očekivati, ukupan naboj  $Q$  ne ovisi o gustoći plina. Napredak u mjernim tehnikama u spektroskopiji i laserskoj dijagnostici dovele su do važnih dodatnih informacija o elektronima, atomima, slobodnim radikalima u individualnim mikroizbojima. Iz rotacijskih struktura veza dobili smo temperaturu plina unutar vlakana mikroizboja. Prisutnost nečistoća u plinu u izboju s dielektričnom barijerom ne može se zanemariti, te mnoga istraživanja naglašavaju njihovu pristupnost [6]. Atomska energija pobuđenja koja je sadržana u metastabilnom stanju može se lako potrošiti na oslobađanje elektrona iz drugog atoma, ako je energija pobuđenja veća od ionizacijske energije. Ovaj efekt poznat je pod nazivom Penningov efekt i može biti važan u izboju s dielektričnom barijerom kod helija. Nemoguće je potpuno eliminirati nečistoće iz vakuumske cijevi, ono što ostaje u komori uobičajeno je zrak, odnosno dosta dušika (u prvoj aproksimaciji). Ionizacijska energija dušika je oko 15 eV. Više grupa je proučavalo važnost Penningovog efekta na izboj i pri niskom električnom polju važno je usporediti direktnu ionizaciju atomskog helija. Njegova uloga je dovesti elektrone na prvu razinu raspada. Izboj s dielektričnom barijerom je relativno lak način za stvaranje neravnotežne plazme pri atmosferskom tlaku. Jedan od problema vezan uz izboj s dielektričnom barijerom je njegova sklonost vlaknastom izboju, dok je za određene primjene potreban uniforman izboj. Izboj s dielektričnom barijerom i njegov prijelaz u tinjajući izboj pri atmosferskom tlaku (APGD – eng. Atmospheric pressure glow discharge) u heliju je relativno poznat, puno istraživanja se još mora izvesti u drugoj vrsti okruženja poput dušika zbog visoke cijene helija.

### **3.2.2 Kemija plazme mikroizboja**

U ranim fazama formacije mikroizboja, zbog energetskih elektrona, ionizacijskih procesa i nakupljanja naboja u prostoru, dolazi do umnožavanja elektrona pomoću procesa pobuđenja i disocijacije. Ionske i pobuđene atomske i molekularne čestice pokreću kemijske reakcije koje konačno rezultiraju sintezom željenih čestica (npr. ozon,

...) ili destrukcijom onečišćivača (npr. razni organski spojevi, amonijak, sumporovodik, sumporov dioksid, otrovni plinovi ...). Naziv kemija plazme opisuje situaciju u kojoj su glavni reakcijski putevi dominirani reakcijama nabijenih čestica. Ovo je slučaj u velikom broju izboja pri niskom tlaku. No, u primjenama izboja s dielektričnom barijerom većina nabijenih čestica nestane prije nego što dođe do većih promjena. U ovom slučaju najprikladnije je govoriti o kemiji slobodnih radikala koja primarno uključuje neutralne čestice poput atoma, dijelova molekula i pobuđenih molekula. Aktivnost izboja i rasipanje energije većinom se događa unutar malog, mikroizbojem zaposjednutog, dijela volumena. Početne uvjete za započinjanje kemijskih reakcija postavlja generacija aktivnih čestica. Uvjet za detaljno razumijevanje kemije izboja s dielektričnom barijerom je adekvatna slika fizičkih procesa tijekom proboja i formacija mikroizboja. Svaki mikroizboj možemo promatrati kao mini-jaturni kemijski plazma reaktor. Povećanje gustoće snage znači da će se događati više mikroizboja u jedinici vremena i jedinici površine elektrode. U načelu, svojstva individualnih mikroizboja ne mijenjaju se povećanjem skale promatranja. Tipično, prvi korak je disocijacija početne molekularne vrste prilikom sudara s elektronom. Istrajivalo se disocijaciju molekule kisika i dušika prilikom elektronskog sudara u vezi s generacijom ozona od kisika iz zraka te svojstva ugljikova dioksida s ciljem optimiziranja lasera koji ga koriste. Važno pitanje koje utječe na efikasnost primjene izboja s dielektričnom barijerom je efikasnost procesa početne disocijacije s obzirom na potrošnju energije. Disocijacija kisika pod utjecajem sudara s elektronom može biti veoma efikasna (do 85% energije elektrona može biti iskorišteno za proces disocijacije), pod uvjetom da je električno polje u području od 100 do 300 Td, čemu odgovara prosječna energija elektrona od oko 4 do 8 eV. U čistom dušiku djelić energije izboja potrošen na disocijaciju je puno manji zbog energije potrošene za pobuđenje vibracijskih nivoa. U ugljikovom dioksidu u najboljem slučaju najviše 40% energije elektrona može biti iskorišteno za proces odvajanja. Efikasnost različitih procesa ovisi o poprečnom presjeku elektronskog sudara i smanjenog polja  $E/n$  [4].

### 3.2.3 Numeričko modeliranje

Kako bi modelirali stvaranje mikroizboja potreban nam je 2D model. Rane faze mogu se tretirati jednadžbama koje se koristi za opisivanje kretanja mikroizboja u pulsirajućim korona izbojima. Kako bi uključili pojavu gušenja potrebno je uvesti

dodatne uvjete vezanja koji se mogu pobrinuti za nakupljanje naboja na dielektričnoj površini i lokalno smanjenje električnog polja u praznini između elektroda kao posljedicu toga. U trenutku kada polje padne ispod vrijednosti potrebne za održavanje ionizacije mikroizboj se gasi. Ovaj proces je brži u smjesama plinova koji pokazuju snažno vezanje. Kako bi pokazali evoluciju mikroizboja koristimo dvije jednačbe. Jednačbu kontinuiteta za nabijene čestice  $n_i$  (elektroni, pozitivni i negativni ioni) s izvorima i ponorima  $S_i$  (opisuje ionizaciju i vezanje) možemo pisati kao:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \nabla \cdot (vn_i + D_i \nabla n_i) = S_i \quad (3.1)$$

gdje je  $v = \mu E$  je brzina strujanja, definirana kao pokretljivost puta električno polje snage  $E$ , a  $D_i$  je koeficijent difuzije.  $E$  je definiran kao gradijent potencijala  $\phi$ ,  $E = -\nabla \phi$ . On je vezan za gustoću naboja  $\rho$  preko Poissonove jednačbe:

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (3.2)$$

Jednačbe se istovremeno moraju riješiti u praznini između elektroda i unutar dielektrika s odgovarajućim graničnim uvjetima. Kako bi uzeli u obzir radijalno širenje mikroizbojnog kanala tijekom kemijskih promjena razvijeni su kompleksni 2D modeli za baratanje raspadima, kemijom plazme i hidrodinamičkom ekspanzijom, a nije se zaboravilo ni na interakciju susjednih mikroizboja. Sofisticirani numerički modeli razvijeni su kako bi opisali inicijaciju izboja, pobuđenje i generaciju vakuumske ultraljubičaste (VUV - eng. vacuum ultraviolet) radijacije u smjesama plemenitih plinova koji se koriste u minijaturnim ćelijama plazma ekrana. Pri atmosferskom tlaku broj sudara je velik i elektroni dostižu ravnotežne uvjete koji odgovaraju lokalnom polju u pikosekundama. Mikroizbojima za nastanak treba oko nanosekunda, reakcije sa slobodnim radikalima mogu trajati od mikrosekunde do milisekunde, a kemijske reakcije u osnovnom stanju mogu trebati mnogo više vremena kako bi dosegle ravnotežne uvjete. "Rate coefficient" (eng. koeficijent brzine) za elektronske sudare većim dijelom ovisi o smanjenom električnom polju  $E/n$  ili srednjoj vrijednosti energije elektrona. "Rate coefficient" za kemijske reakcije može jako ovisiti o temperaturi plina. U plinovima pri atmosferskom tlaku elektroni približavaju vrijednostima stabilnog stanja za oko 20 pikosekundi. To je otprilike tisuću puta kraće od tipičnog trajanja mikroizboja [4].

### 3.2.4 Općeniti parametri izboja

Budući da je vrijeme potrebno za mikroizboj reda veličine nanosekunde, a vrijeme trajanja većina primjena puno veće, uobičajeno je da je izboj s dielektričnom barijerom karakteriziran velikim brojem mikroizboja po jedinici površine elektrode i po ciklusu. Tipična vrijednost je oko  $10^6$  mikroizboja po  $\text{cm}^2$  po sekundi. Ovaj broj prvenstveno ovisi o gustoći snage te o prisutnosti UV zračenja. Za danu konfiguraciju i fiksirane radne parametre, svi mikroizboji su slične prirode. Pokreće ih dobro definiran napon proboja, a prekinuti su dobro definiranim tokom struje ili prijenosom naboja. Za razne svrhe dovoljno je opisati naboj općenitim kvantitativnim veličinama: primijenjena frekvencija  $f$ , maksimalan primijenjen napon  $U$  i srednji napon izboja u praznini između elektroda pri kojima se primjećuje mikroizboj. Zanimljivo svojstvo formule za snagu izboja s dielektričnom barijerom koju je prvi uveo Manley je da se uzima samo maksimalna vrijednost primijenjenog napona:

$$P = 4fC_D U_{Dis} \{ \hat{U} - C_D^{-1}(C_D C_G) U_{Dis} \}, \hat{U} \geq C_D^{-1}(C_D C_G) U_{Dis}. \quad (3.3)$$

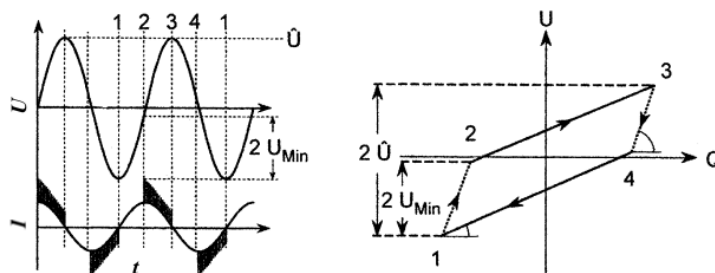
Ona povezuje ukupnu snagu uz radnu frekvenciju  $f$ , maksimalni napon  $\hat{U}$  i kapacitivnost dielektrika  $C_D$  i praznine između elektroda  $C_G$ , veličine koje karakteriziraju konfiguraciju elektroda. Budući da se srednji napon izboja  $U_{Dis}$  ne može točno odrediti, ponekad je prikladnije koristiti minimalan vanjski napon  $U_{Min}$  pri kojem se mogu uočiti mikroizboji u praznini između elektroda:

$$P = 4fC_D^2 + (C_D C_G)^{-1} U_{Min} (\hat{U} - U_{Min}), \hat{U} \geq U_{Dis}. \quad (3.4)$$

Jednostavna relacija  $U_{Min} = C_D^{-1}(C_D C_G) U_{Dis}$  povezuje ove dvije veličine te se može koristiti kao definicija  $U_{Dis}$ . Tijekom ovih faza nagib Lassajousove krivulje odgovara kapacitetu dielektrika. Tijekom mirovanja ciklusa odgovara konfiguraciji elektroda u odsutnosti plazme. Ovisno o maksimalnom naponu aktivnost mikroizboja ograničena je na određen dio ciklusa. Eksperimentalno određivanje raspršene snage u izboju s dielektričnom barijerom je zahtjevno jer se u stvarnosti snaga troši na veliki broj kratkotrajnih mikroizboja. Prateći originalan Manleyjev rad, mnogi autori su koristili Lassajousove krivulje napona/naboja kako bi odredili srednju snagu (Slika 3.6). Trik je u korištenju struje i naboja integriranih po vremenu radije nego individualnih



maksimuma struje mikroizboja.



Slika 3.6: Simbolički prikaz aktivnosti mikroizboja i odgovarajuće Lissajousove krivulje napona/naboja [4].

To se može postići tako da u seriju s DBD - om spojimo kondenzator. Napon na krajevima kondenzatora proporcionalan je naboju. Može se pokazati da površina zatvorene petlje primijenjenog napona/naboja predstavlja energiju potrošenu tijekom jednog perioda. Oblik ove Lissajousove krivulje napona/naboja sadrži bitne informacije o izboju. Za idealni kapacitet Lissajousova krivulja prelazi u ravnu liniju, a otpor u elipsu. U većini primjena izboja s dielektričnom barijerom krivulja nalikuje idealnom paralelogramu iz čega se mogu iščitati napon izboja, efektivni kapacitet praznine između elektroda i dielektrika. U slučaju izboja s dielektričnom barijerom kod CO<sub>2</sub> lasera (praznina od 4 cm između elektroda pri tlaku od 13kPa) Lissajousova krivulja nalikuje na elipsu, što ukazuje na prisutnost ostatka iona u svakom trenutku. U slučaju plazma ekrana ćelije rade pri pravokutnim valovima frekvencija od 100kHz te je krivulja također paralelogram sa skoro horizontalnim dijelovima. Također, krivulje struje i napona koriste se za dobivanje informacija o pokretanju i gašenju izboja [4].

## 4 Primjena izboja s dielektričnom barijerom

### 4.1 Dobivanje ozona

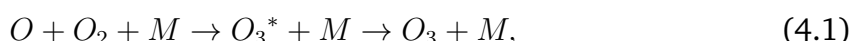
Tijekom svojih istraživanja vezanih za elektrolize vode Christian Friedrich Schönbein je primijetio specifičan miris u svome laboratoriju što ga je navelo na mogućnost postojanja novog produkta njegovog eksperimenta. Novom spoju nadjenao je ime ozon prema grčkoj riječi „ozein“ koja znači imati miris. Miris ozona Schönbein je povezao s mirisom koji se pojavljuje i kod oluja te time ukazuje na prisutnost ozona u atmo-

sferi. Nakon što je Schönbein 1839. godine identificirao ozon kao novi kemijski spoj, Werner Siemens je 1857. predložio svoju metodu za pouzdano generiranje ozona pomoću prolaska zraka ili kisika kroz prostor u kojem vlada izmjenični napon spojen na bar jednu dielektričnu barijeru. Danas se za industrijsku proizvodnju ozona koriste kisik ili zrak pri tlakovima od 0.1 i 0.3 Mpa.

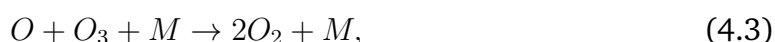
#### 4.1.1 Kinetika generacije ozona iz kisika ili zraka

Kako bi optimizirali kinetiku reakcija stvaranja ozona, od velike je važnosti kontroliranje uvjeta u kojima se nalazi plazma unutar područja mikroizboja. To se može postići prilagodbom tlaka, širine pukotine između elektroda, svojstava električne barijere (permitivnost, debljina) i kruga napajanja. Uvjeti u kojima se plazma nalazi u mikroizbojima moraju biti optimizirani za pobuđenje i disocijaciju molekula kisika i dušika. U početku, većina energije koju su elektroni dobili u električnom polju pohranjena je u pobuđenim atomskim i molekularnim stanjima. Elektronskom pobudom osnovnog stanja molekule kisika moguće su dvije reakcije - putem pobuđenja stanja  $A^3\Sigma_u^+$  energijom praga oko 6eV i putem pobuđenja stanja  $B^3\Sigma_u^-$  početnog stanja na 8.4 eV.

Ozon se tada formira putem sljedeće reakcije:



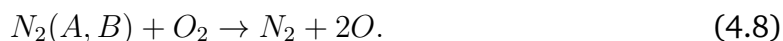
gdje je  $O_2$  molekula kisika,  $O_3$  molekula ozona, a M je treći sudarni partner:  $O_2$ ,  $O_3$ ,  $O$  ili u slučaju zraka molekula dušika,  $N_2$ .  $O_3^*$  stoji za prijelazno pobuđeno stanje u kojem je molekula ozona formirana nakon reakcije atoma i molekula kisika. Vrijeme potrebno za formiranje ozona pri atmosferskom tlaku je nekoliko mikrosekundi. Sporedne reakcije u kojima sudjeluju atomi kisika događaju se usporedno s reakcijama stvaranja ozona.



Navedene sporedne reakcije su neželjene i postavljaju gornju granicu na koncentraciji

ciju atoma ili razinu disocijacije koju je moguće tolerirati u mikroizbojima. Optimiziranje svojstava mikroizboja za formiranje ozona temelji se u pronalasku kompromisa između velikih gubitaka energije zbog iona u slabim mikroizbojima i izbjegavanju neželjenih sporednih kemijskih reakcija kada mikroizboji postanu previše jaki.

Prisutnost atoma i iona dušika  $N^+$  i  $N_2^+$  povećavaju složenost reakcijskog sustava. Osim ozona stvaraju se razne vrste dušikovih oksida: dušikov monoksid ( $NO$ ), didušikov oksid ( $N_2O$ ), dušikov dioksid ( $NO_2$ ), nitrati ( $NO_3^-$ ) i didušikov pentoksid ( $N_2O_5$ ), te su svi bili otkriveni pomoću spektroskopskih tehnika. Možemo sumirati glavne aspekte stvaranja ozona: zbog pobuđenja i disocijacije molekula dušika dolazi do niza dodatnih reakcija. Te reakcije uključuju atome dušika i pobuđena molekularna stanja  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  i  $N_2(B^3\Pi_u^+)$  koja mogu dovesti do stvaranja dodatnih atoma kisika pomoću kojeg dobivamo ozon.



Ovi indirektni procesi dovode do stvaranja polovice ozona formiranog u izbojima. Posljedica toga je da stvaranje ozona u zraku (oko 100  $\mu s$ ) traje duže nego u kisiku (oko 10  $\mu s$ ). Preko navedenih reakcija možemo, prvotno u sudaru s molekulama dušika, izgubljenu energiju elektrona povratiti i iskoristiti za stvaranje ozona.

No određeni utjecaji mogu dovesti do potpunog raspada procesa stvaranja ozona. Smanjenjem toka zraka ili primjenom dodatne snage moguće je doseći određen stupanj koncentracije  $NO/N_2O$  koji ima takav utjecaj. Takvo stanje naziva se trovanje izboja (eng. discharge poisoning), a uočili su ga Andrews i Tait 1860. godine. Pri navedenim uvjetima produkti reakcije mogu biti  $NO$ ,  $NO_2$  i  $N_2O$ , no ne i ozon ili  $N_2O_5$ . Dolazi do brzih reakcija stvaranja  $NO_x$ , pri kojima se atomi kisika troše brže od reakcija formiranja ozona. Kao rezultat dobivamo, uz prisutnost molekula  $NO$  i  $NO_2$ , kataliziranu rekombinaciju atoma kisika te dolazi do uništenja prethodno stvorenog ozona.

Prema Crutzeniu i Johnstonu slične reakcije utječu na stratosfersku koncentraciju

ozona. Reakcije uključuju  $NO$  i  $NO_2$  i ekstremno su brze, te čak i relativno male koncentracije  $NO_x$  (od oko 0.1%) mogu ozbiljno utjecati na stvaranje ozona. Ako na ulazu u generator ozona dodamo tragove  $NO$  i  $NO_2$  kisiku ili zraku formacija ozona je spriječena. Do smanjene stvaranja ozona ili čak potpune odsutnosti ozona kao produkta može dovesti i povišena temperatura u prostoru između elektroda. To su 1940. godine demonstrirali Schultz i Wulf – veći dio produkata ozonizatora, napunjenog zrakom na  $800^{\circ}C$ , činili su dušikovi oksidi [4].

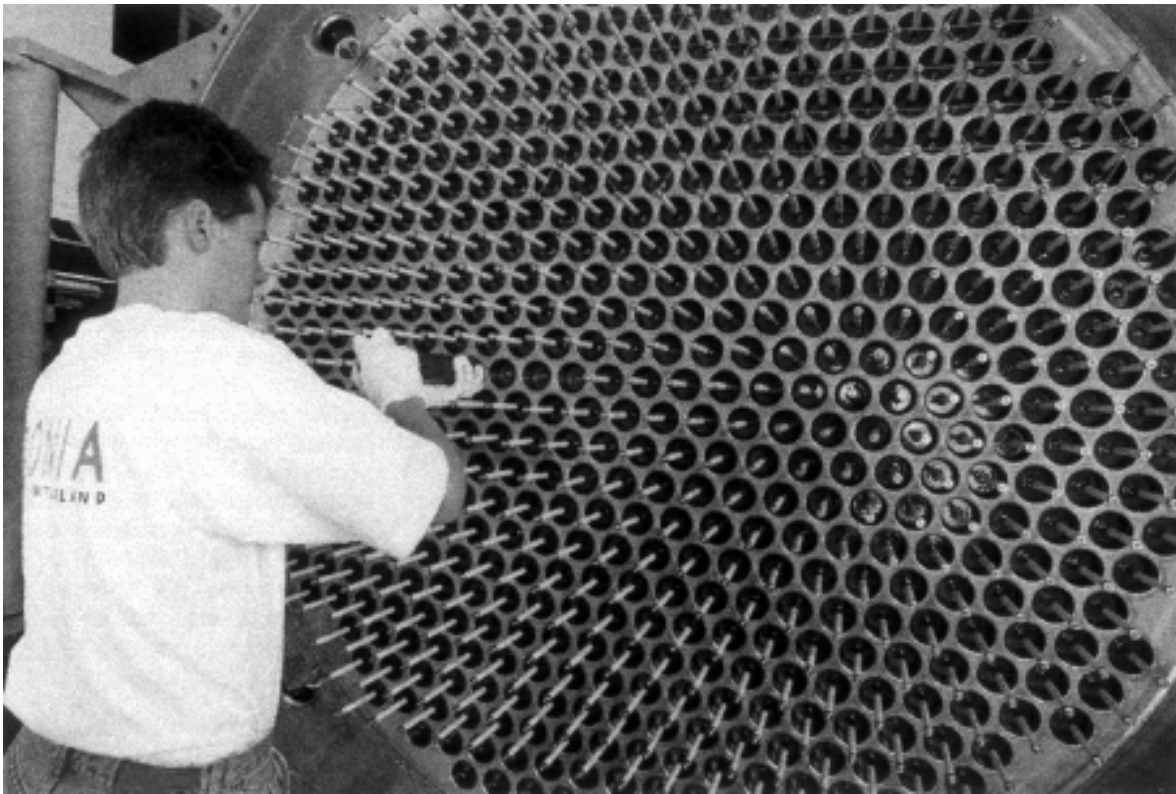
#### 4.1.2 Tehnički aspekti industrijske proizvodnje ozona

Početkom 20. st u Parizu i Nici u Francuskoj te u St. Petersburgu u Rusiji izgrađene su prve velike ozonske instalacije za dezinfekciju vode. Koristile su se dielektrične ploče ili cilindrični dielektrik u obliku staklenih cijevi. Bolje razumijevanje procesa formiranja ozona u izboju s dielektričnom barijerom i prilagođavanje svojstava mikroizboja dovelo je i do poboljšanja industrijskog stvaranja ozona.

Veća razina produkcije ozona i mnogo veće koncentracije ozona se pouzdano mogu dostići u puno većim generatorima ozona kao rezultat korištenja visokih frekvencija i nižih radnih napona za danu ulaznu snagu. Zanimljivo je napomenuti da je već 1921. godine Starke demonstrirao da energijska efikasnost procesa formacije ozona ne ovisi o primijenjenoj frekvenciji između 50 Hz i 10 kHz.

U većini generatora za izboj se koriste cijevi duljine od 1 do 3 m i promjera od 20 do 50 mm. Već duže vrijeme jedan od materijala koji se najčešće koristi je boro-silikatno staklo. Staklene cijevi s otvorom na jednoj strani smještene su unutar malo širih čeličnih cijevi te se na taj način stvara kružna pukotina između elektroda promjera od 0.5 do 1 mm. Proces smještanja staklenih cijevi i geometrijske tolerancije čelika i stakla predstavljaju važan problem pri izadi generatora ozona. Velik utjecaj na svojstva mikroizboja, tok mase i tok topline imaju lokalna odstupanja od širine pukotine između elektroda te mogu znatno smanjiti efikasnost ozonizatora. Uz precizno izrađene, jako uske pukotine između elektroda širine 0.1 mm, učinkovitost rada je najveća.

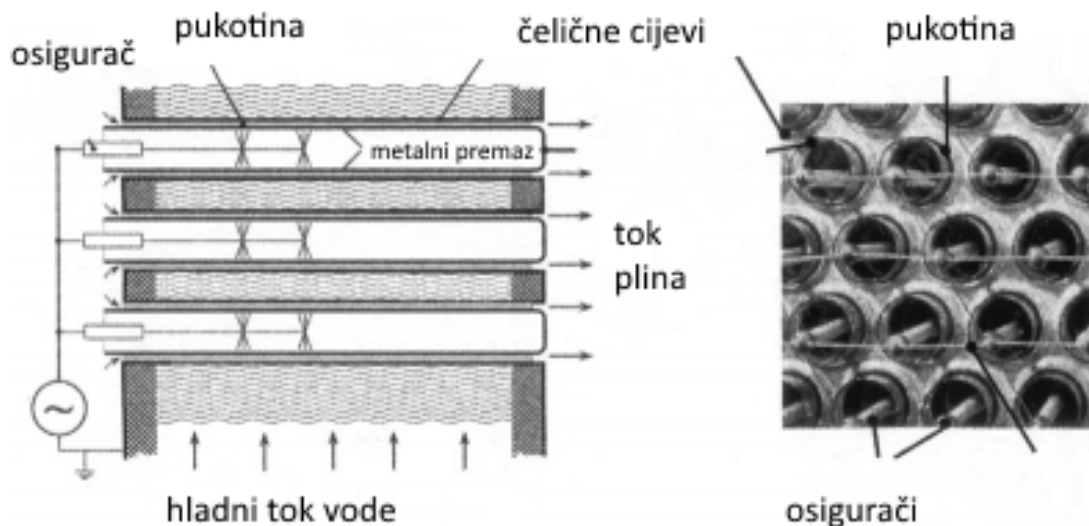
Metalni premazi poput tankog aluminijskog filma, unutar staklene cijevi služe kao visoko naponske elektrode. Moderni generatori ozona visokih performansi ne koriste staklo već dielektrik u obliku tankog premaza na čeličnim cijevima. Broj nanešenih



Slika 4.1: Pomoću dielektrika proizvodnja naprednih ozonizatora iznosi 60 kg/h

premaza ovisi o optimalnim dielektričnim karakteristikama. Ove premazane čelične cijevi čvršće su od tradicionalnih staklenih cijevi. Svaku individualnu cijev štiti osigurač. U slučaju kvara, osigurač prekida neispravan element strujnog kruga. Na taj način ostale cijevi mogu nastaviti s radom. Veliki generatori ozona koriste od nekoliko stotina do tisuću cijevi unutar velikog čeličnog spremnika kako bi pružili područje elektroda dovoljno veliko za masovnu proizvodnju ozona. Zatvoren dio za hlađenje čine vanjske čelične cijevi zalemljene za dvije cijevi paralelnih prirubnica. Hlađenje se vrši pomoću okomitog toka vode (Slika 4.2) . Reakcije stvaranja ozona i mala termalna stabilnost molekule ozona zahtijevaju niske temperature te je iz tog razloga efikasno hlađenje od velike važnosti i posvećuje mu se mnogo pažnje. Koncentracija ozona najviša je u toku plina koji se nalazi na izlasku. S obzirom da je to najosjetljivije područje, hladni mlaz prvo dolazi do tog dijela.

Alternativni način izrade, koji se većim dijelom koristi u manjim generatorima ozona, koristi površinski izboj s tankim paralelnim trakama elektroda smještenim na keramičkim cijevima. Ovakav način uveo je S. Masuda 1988. godine. Utjecaj na masovnu proizvodnju ozona bio je malen, no verzija s malim izmjenama koristila se u proizvodnji plazma ekrana. Moderni visokonaponski generatori ozona koriste



Slika 4.2: Cijevi za izboj u ozonizatoru (preuzeto iz [4])

napredne uređaje za napajanje poluvodiča. Koriste pretvarače frekvencija upravljane pomoću tiristora ili tranzistora kako bi dobili struju u obliku pravokutnih pulseva ili specijalno tvorene pulseve u srednjem području frekvencija. Tipične radne frekvencije su između 0.5 i 5 kHz. Primijenjeni napon se, pomoću ove tehnologije, smanjuje do vrijednosti od oko 5 kV i na taj način skoro eliminira rizik od kvara. U velikim generatorima ozona, važno pitanje čini faktor kompenzacije snage. Tipična gustoća snage doseže vrijednosti od 1- 20 kW /m<sup>2</sup> područje elektrode. Velike instalacije ozona dosežu ulaznu snagu od nekoliko MW. Kapacitet jednog spremnika za generaciju ozona trenutno iznosi oko 100 kg/hr [4].

#### 4.1.3 Priprema plina

Generatori ozona normalno rade sa suhim čistim zrakom ili suhim kisikom. U oba slučaja točka rosišta trebala bi biti ispod -60°C. Iz tog razloga količina vodene pare ostaje na nekoliko ppm. Vлага u plinu ima dva štetna utjecaja na stvaranje ozona. Povećava površinsku vodljivost dielektrika što dovodi do jačih mikroizboja. Kroz stvaranje  $OH$  i  $H_2O$  radikala utječe na reakcije stvaranja ozona preko dodavanja dodatnih katalizatorskih mehanizama uništavanja ozona. Uz prisutnost  $OH$  radikala molekule  $NO$  i  $NO_2$  brzo prelaze u  $HNO_2$  i  $HNO_3$ . Uz prisutnost tragova  $H_2$  ili ugljikovodika također se mogu primijetiti negativni utjecaji na stvaranje ozona. Većina velikih generatora ozona koriste čisti kisik ili kisik s 1% dušika. Prisutnost dušika ima izražajan pozitivan utjecaj na stvaranje ozona. U odnosu na vrijednosti dobivene

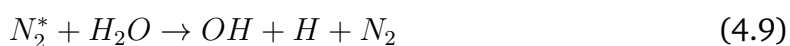
u čistom kisiku, tragovi dušika povećavaju efikasnost stvaranja ozona i ostvarljivu koncentraciju ozona [4].

## 4.2 Pročišćavanje zraka

Ostvarenje velike snage izboja s dielektričnom barijerom dovelo je do njihove primjene za kontrolu zagađenja i omogućilo tretiranje velikih struja plina pri atmosferskom tlaku. Način iskorištenja izboja s dielektričnom barijerom u svrhu kontrole plinovitih zagađivača te za uništavanje otrovnih spojeva istraživalo je nekoliko znanstvenika. Uništavanje  $H_2S$  je 1876. istraživao Berthelot, a 1929. Shwarz i Kunzer [4]. Istraživanja su 1992. nastavili Traus i Suhr [21]. Istraživanja o vojnom otrovnom otpadu izvodili su Clothiaux i njegova skupina [22] te Fraser i Sheinson [4]. Mnogi su se posvetili raspadu dušikovih oksida, oksidima sumpora u dimnim plinovima te organskim spojevima koji lako isparavaju (VOC - eng. volatile organic compounds), poput ugljikovodika, kloriranih ugljikovodika te klorofluorouglijika (CFC), fluorouglijika (PFC) i ostalih opasnih zagađivača zraka (HAP - eng. hazardous air pollutants). Zagađenje zraka s organskim spojevima koji lako isparavaju česta je posljedica raznih industrijskih procesa poput proizvodnje poluvodiča, kemijske obrade, kemijskih čistionica te printaonica. Takva zagađenja tla i vode često se mogu tretirati u plinovitom obliku nakon isparavanja tih spojeva. Kontrola neugodnih mirisa u tvornicama ribe i životinjskim nastambama je još jedna od primjena izboja s dielektričnom barijerom. Mnogi postupci uključuju uništenje vodikovog sulfida i amonijaka [4].

### 4.2.1 Sanacija otrovnih plinova pomoću plazme

Izboj s dielektričnom barijerom koristi se kako bi se dobile reaktivne čestice poput  $N_2^*(A^3\Sigma_u^+)$ ,  $N_2^{*n}(A^3\Sigma_u^+)$ ,  $N_2^*(B^3\Pi_g)$ ,  $O_2^*(a^1\Delta_g)$ ,  $O(^1D)$ ,  $O(^3P)$  i  $N(^4S)$ . U ispušnim i dimnim plinovima vodena para može imati važnu ulogu. Kao dodatak direktnoj disocijaciji molekula vode pomoću elektrona, čestice koje nastaju pod utjecajem sudara elektrona u vlaknima mikroizboja reagiraju zatim s molekulom vode te se stvaraju radikali vodika, hidroksida i vode za raspadanje zagađivača.





Zbog uvjeta u kojima obično radi izboj s dielektričnom barijerom, pri kojima je koncentracija radikala u optimiziranim mikroizbojima tako niska, može biti zanearena rekombinacija radikala ili anihilacije među radikalima. Hidroksidov radikal (OH) je izuzeto učinkovit oksidans, te je njegov potencijal oksidiranja (2.8 V) znatno viši od potencijala ozona (2.07V). U većini primjena to je dominantni oksidans te ima važnu ulogu u čišćenju troposfere. Kada se u industriji koristi kontrola zagađenja, cilj je pretvoriti otrovne spojeve u bezopasne ili manje opasne tvari poput kisika, ozona, ugljikovog oksida, ugljikovog dioksida, vode, jednostavne kiseline ili uz dodatak amonijaka u čvrste čestice soli koje se lako mogu ukloniti ili iskoristiti kao gnojiva. Ponekad nakon tretmana plazmom slijedi još koraka kako bi proces čišćenja bio potpun [4].

#### 4.2.2 Tretman lako isparivih organskih spojeva

Korištenje plazme izboja s dielektričnom barijerom u svrhu sanacije pokazalo se korisnim u više laboratorija i istraživanja. Istraživali su uništenje raznih spojeva: metana ( $CH_4$ ), butana ( $C_4H_{10}$ ), propena ( $C_3H_6$ ), benzen ( $C_6H_6$ ), toluen (metilbenzen,  $C_6H_5CH_3$ ), stiren (vinilbenzen,  $C_6H_5CHCH_2$ ), ksilen (dimetilbenzen,  $C_6H_4(CH_3)_2$ ), formaldehid ( $HCHO$ ), acetaldehid ( $CH_3CHO$ ), metanol ( $CH_3OH$ ), propanol ( $C_3H_7OH$ ), ugljikov tetraklorid ( $CCl_4$ ), diklorometan, trikloroetan ( $TCA$ ,  $C_2H_3Cl_3$ ), trikloroetilen ( $TCE$ ,  $ClHC = CCl_2$ ), perkloroetilen ( $PCE$ ,  $C_2Cl_4$ ), metilen klorid ( $CH_2Cl_2$ ), klorobenzen ( $C_6H_5Cl$ ), tetrafluorometana ( $CF_4$ ).

Možemo zaključiti da netermalna plazma<sup>3</sup> koristi većinu energije izboja kako bi se stvorili i ubrzali elektroni. Elektroni tada stvaraju visoko reaktivne radikale koji mogu selektivno razgraditi toksične spojeve. To se može postići pri malim temperaturama plina i pri atmosferskom tlaku. Pri koncentracijama razrijeđenih zagađivača od oko 1000 ppm, potrebno je znatno manje energije za tretman neravnotežne plazme nego kod spaljivanja ili termalnog tretmana s plazmom. U velikom broju slučajeva to je eko-

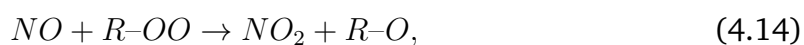
<sup>3</sup>Netermalna ili hladna plazma je plazma koja se ne nalazi u termodinamičkoj ravnoteži jer je temperatura elektrona znatno viša od temperature težih čestica (iona i neutralnih). S obzirom da su jedino elektroni termalizirani, njihova Maxwell - Boltzmanova distribucija brzine je različita od ionske distribucije brzina.



nomičnije od povišenja temperature cjelokupnog toka plina do temperature na kojoj se može postići kataliziran raspad (200- 500 °C) [4].

#### 4.2.3 Tretman ispušnih plinova dizelskog motora

Veliko tržište za primjenu izboja s dielektričnom barijerom moglo bi se otvoriti zbog tretmana  $NO_x$  u ispušnim plinovima dizelskih motora. S potrošnjom goriva modernih dizelskih motora s direktnim ubrizgavanjem ne može se mjeriti ni jedna druga vrsta motora. Iz tog razloga je u interesu velikih automobilskih tvrtki pronaći način na koji bi se dizelski motori uskladili s Kyoto protokolom za smanjenje stvaranja ugljikova dioksida. Korištenje dizelskih motora zahtijeva bolju kontrolu  $NO_x$  i ispušnih plinova. Početna istraživanja pokazuju da je smanjenje  $NO$  u ispušnim plinovima  $N_2$  izvedivo. No, u stvarnom dizelskom ispušnom plinu, prisutnost kisika i vodene pare dovodi do visoko oksidirajuće okoline u uvjetima plazme. Kao posljedica toga željene reakcije koje pretvaraju  $NO$  u  $N_2$  i  $O_2$  su tek od manje važnosti. Posljednja istraživanja pokazuju kako je uz pomoć dodatka ugljikovodika moguća selektivna oksidacija  $NO$  u  $NO_2$  bez neželjenog stvaranja  $SO_3$  iz  $SO_2$ . Osim toga, moguće je potisnuti stvaranje dušikaste kiseline ( $HNO_2$ ) i dušične kiseline ( $HNO_3$ ), čak uz prisutnost vodene pare. Prisutnost nekih ugljikovodika, poput etena ( $C_2H_4$ ), propena ( $C_3H_6$ ) i propana ( $C_3H_8$ ), drastično mijenja kinetiku reakcije oksidacije  $NO$ . U takvom plazma okruženju hidroperoksi radikal ( $HO_2$ ) i peroksi radikal ( $R-OO$ ) su dominantni oksidansi,

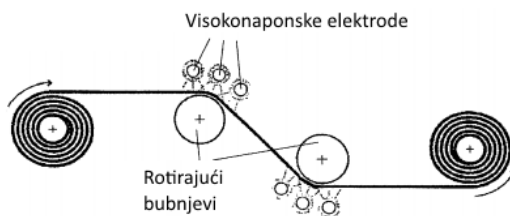


gdje je R oznaka za bilo koju skupinu u kojoj su ugljikov ili vodikov atom vezani na ostatak molekule. Iz reakcije H s  $O_2$  stvara se  $HO_2$ , peroksi radikal iz reakcija s hidroksialkilom i alkil radikalima, koji također brzo reagiraju s  $O_2$ . Mjerenja kao i numeričke simulacije pokazuju kako energija potrebna za oksidaciju  $NO$  molekule može biti znatno smanjena u prisustvu etena, propena ili propana. Obećavajuća shema za tretman dizelskih ispušnih plinova je hibridni sistem koji koristi plazmu za oksidaciju izboja s dielektričnom barijerom popraćenu raznolikim procesima koji na kemijski način pretvaraju  $NO_2$  u  $N_2$ ,  $O_2$  i  $H_2O$  pomoću selektivne katalize. Ovaj proces naziva se plazmom potaknuta selektivna katalitička redukcija (PE – SCR- eng. Pla-

sma enhanced selective catalytic reduction). Opsežni pokušaji modeliranja posvećeni su kinetici plazme  $NO_x$  u suhim i vlažnim strujama zraka te ulozi neizgorenih ugljikovodika ( UHC – eng. unburned hydrocarbon) i čestice u ispušnim plinovima. Detaljnije su o tome pisali M. Klein, S. Bröer te R. Dorai [20] [4] .

### 4.3 Modifikacije površine

Kad su se oko 1960. godine počeli pojavljivati lako dostupni plastični i drugi polimerni materijali pojavila se potreba za modifikacijom površinskih svojstava takvih materijala zbog lakše primjene. Većina plastike loše se veže za tiskarske tinte, pre-maze i ljepila, a razlog za to je njena nepolarna, kemijski inertna površina. Glavno svojstvo odgovorno za ovakvo ponašanje je niska površinska energija. Korona izboj pri atmosferskom tlaku je jedan od načina za znatno povećanje površinske energije različitih podloga. Svojim razvojem taj proces je dobio na pouzdanosti te se svojom brzinom može mjeriti s brzinom proizvodnje folija. Za komercijalni korona tretman, prekrivanjem rotirajućeg bubnja ili elektrode s dielektrikom primijenjen je izboj s dielektričnom barijerom. Prednost korištenja izboja s dielektričnom barijerom je što prisutnost dielektrika sprječava električno bušenje plastične folije te se mogu tretirati električno vodljive mreže i metalne folije. Veliki postavi korona tretmana mogu tretirati folije širine do 10 metara pri brzinama prolaska većim od 10 m/s. Izboj s dielektričnom barijerom čija je širina pukotine između elektroda nekoliko milimetara pri atmosferskom tlaku poznajemo iz generatora ozona. Tipične frekvencije rada su od 10 do 50 Hz. Njih stvara izvor napajanja koji može doseći snagu veću od 50 kW. Ovaj tretman plazme pri atmosferskom tlaku ima rezultat sličan izboju u kisiku pri niskom tlaku, a dovodi do značajnog povećanja površinske energije. Tipična



Slika 4.3: Dvostrani tretman folije izbojem s dielektričnom barijerom. [4]

vrijednost površinske energije netretiranog polimera je od  $50 - 70 \text{ mJ/m}^2$  , a nakon tretmana za plastičnu foliju ona se mijenja od  $20 - 30 \text{ mJ/m}^2$  . Što je veća

površinska energija, to je materijal lakše močiti, tako da je ovo poželjan efekt. Prema tome, tretman plazmom povećava prijanjanje, mogućnost za tiskanje te upijanje boje. Nedavna istraživanja uključuju i poboljšanje svojstava vune i tekstila. Tijekom aktivacije površine radikali stvoreni u plazmi ometaju kemijske veze u površinskom sloju te uzrokuju formiranje novih vrsta čestica s drugačijim svojstvima. Rezultat toga je modifikacija, no bez mijenjanja poželjnih svojstava materijala. Aktivne čestice u plazmi zraka su atomi kisika koji dovode do nakupljanja oksidiranog ugljika na površinskom sloju. Fotoelektronska spektroskopija rendgenskih zraka (XPS-X - eng. X - ray photoelectron spectroscopy) plazmom tretiranog polietilena male gustoće (LDPE – eng. low density polyethylene) pokazala je povećanje omjera kisik/ugljik za 30% nakon tretmana plazmom. Odabirom drugačije plinske okoline, moguće je uklopiti i druge atome poput dušika, fluora, silicija... Ovo se tradicionalno postiže u zatvorenim komorama tinjajućeg izboja pri niskom tlaku. Posebna pažnja posvećena je reaktivnim smjesama plina koje dovode do taloženja jako tankih premaza s povećanim prijanjanjem ili drugim željenim svojstvima. Izbojem s dielektričnom barijerom mogu se postići premazi polimera i  $SiO_x$  te čak čvrsti premazi ugljika slični dijamantu. Mogućnost za modificiranje, graviranje ili premazivanje površina pri niskim temperaturama i atmosferskom tlaku je bitna prednost za industrijske primjene DBA-a velikih razmjera. Glavna prednost je u tome što nisu potrebne skupe vakuumske pumpe. Očekuje se da će dalje razvijati tehnike premaza koje koriste pare ili taloženje plinske faze u izboju s dielektričnom barijerom. Modifikacija površina i taloženje tankih slojeva u prostorno homogenim, difuznim izbojima pri atmosferskom tlaku još je u laboratorijskoj fazi. Na prostornu homogenost izboja s dielektričnom barijerom može se utjecati koristeći dvije dielektrične barijere, posebno oblikovane metalne elektrode, pažljivo odabirući širinu pukotine između elektroda i radnu frekvenciju, koristeći veće udjele helija ili neona ili određene dodatke poput tragova acetona ili metana u argonu. Istraživanja koja koriste moderne analize površina svjedoče poboljšanim svojstvima, slične onim najbolje dobivenim u tinjajućim izbojima pri niskom tlaku, ako se umjesto vlaknastog izboja s dielektričnom barijerom koriste prostorno homogeni izboji. Relativno nedavna istraživanja na difuznim izbojima s dielektričnom barijerom pri niskoj gustoći pokazuju nove primjene plazme u sterilizaciji i dezinfekciji te za selektivan utjecaj na biološke stanice. Ako bude moguće postići pouzdanu kontrolu ovih difuznih izboja u industrijskom okruženju, možemo očekivati daljnje

primjene izboja s dielektričnom barijerom u svrhu površinskih modifikacija [4].

#### 4.4 Plazma ekrani

Plazma ekrani na izmjeničnu struju koji su koristili ksenonovo vakuumsko ultraljubičasto zračenje i na taj način pobuđivali fosfor na zračenje u vidljivom dijelu spektra su krajem 20. stoljeća činili veoma popularnu primjenu izboja s dielektričnom barijerom. Ova vrsta primjene DBD-a je svojom marketinškom vrijednosti nadmašila ostale primjene. Blitzer i Slottow, profesori na Sveučilištu u Illinoisu u Urbana – Champaign, su 1964., radili na računalno baziranoj nastavi i tražili su grafički prikaz za svoja računala te su odlučili iskoristiti izboj s dielektričnom barijerom za ekrane velikih površina. Matricu individualno adresiranih malih ćelija izboja s dielektričnom barijerom ispunili su Penningovom mješavinom neona i tragovima argona. Ovaj prvi monokromatski plazma ekran je postigao rezoluciju od 512 x 512 piksela. Ovaj efekt su prethodno istraživali Loeb i El Baccal [4] prateći prijašnje radove Harriesa i von Engela [19]. Pokušaji pronalaska plinova koji bi emitirali dodatne boje narančastim linijama neona nisu bili uspješni. Višebojni rad baziran na pobuđenju fosfora demonstriran je već 1973. godine na ploči veličine 1024 x 1024.

Daljnji napredak prema plazma ekranu s bojom postigao se tek kad se Xe VUV zračenje iskoristilo za pobuđenje sloja fosfora smještenog u malu ćeliju za individualan piksel za izboj plina. Kako bi se zadržala dovoljno vidljiva radijacija iz tako malenog volumena, bilo je važno povišiti tlak na vrijednosti gdje dolazi do dovoljne formacije ekscimera, tipično od 50 do 70 kPa (viši tlak pogodan je za stvaranje ekscimera). Iznad 10 kPa reakcije ekscitiranog  $Xe^*$  atoma s dva atoma na osnovnoj razini tvori  $Xe_2^*$  ekscimer brže od radijativnog raspada pobuđenog ksenona  $Xe^*$ . Do stvaranja  $Xe_2^*$  ekscimera dolazi kada je 95%  $He$  ili  $Ne$  iskorišteno kao puferski plin. U svakoj ćeliji vakuumsko ultraljubičasto zračenje pobuđuje crveni, zeleni ili plavi unutarnji fosforov premaz. Svaka ćelija ponaša se kao minijaturna fluorescentna lampa. Ćelije su grupirane kao RGB (crven, zelen, plav) trojke ili kvadrupli RGBG (crven, zelen, plav, zelen). Veliki ekran ima do 1280 x 1024 takvih točaka.

Pomoću dva seta okomito postavljenih tankih niti elektroda postoji kontakt sa svakom individualnom ćelijom. Elektrode su postavljene na dvije paralelne staklene ploče na suprotnim stranama prostora u kojem se nalazi plin ili u koplanarnoj konfiguraciji na

jednoj staklenoj ploči. U ovom slučaju pokretačka elektroda koristi se na suprotnoj strani. U izmjeničnom plazma ekranu sve elektrode prekrivene su sa slojem dielektrika i premazom  $MgO$  otpornim na iskre. Ovaj materijal ima iznimno visok koeficijent za sekundarnu elektronsku emisiju prouzročenu ionima  $Ne^+$  ili  $He^+$  koji pomažu u smanjenju napona proboja. Pravokutni napon frekvencije 50 do 100Hz održava izboj. Na svakoj promjeni polariteta kratak impuls struje trajanja 20 ns pokrenut je u ćeliji te uzrokuje kratak VUV puls. Prosječan intenzitet svake ćelije može biti prilagođen modulacijom radnog ciklusa. Pomoću ove tehnologije moguće je ostvariti približno 17 milijuna nijansi i omjer kontrasta do 3000:1 na ekranu. Maksimalno osvjetljenje doseže  $750 \text{ cd/m}^2$ . Zanimljivo je primijetiti da je bilo potrebno više od 20 godina između otkrića plazma ekrana i tehnološkog napredka koje je omogućilo masovnu proizvodnju velikih ravnih tv ekrana u boji koje je moguće objesiti na zid.

## 4.5 $CO_2$ laser

$CO_2$  laser je bio jedan od prvih plinskih lasera. Izumio ga je Kumar Patel 1964. godine i još uvijek je jedan od najkorisnijih lasera. Shigenori Yagi i njegovi suradnici su, temeljeći na svome znanju o izboju s dielektričnom barijerom u generatorima ozona stvorili svoj SD  $CO_2$  laser (silent discharge) [18]. Ovaj infracrveni ( $\lambda=10.6 \mu\text{m}$ ) laser koristi se za precizno zavarivanje i rezanje debelih metalnih ploča te je brzo postigao komercijalni uspjeh. Za razliku od ostalih komercijalnih  $CO_2$  lasera koji rade pri frekvencijama od 13.65 MHz do 27.3 MHz, SD laser koristi prilično niske frekvencije između 50 kHz i 200 kHz. Prednost niskih frekvencija je u tome što sloj dielektrika na elektrodama (staklo ili aluminijev oksid) efektivno ograničava struju izboja i stabilizira izboj. Još jedna prednost je pristupačnost jeftinog, jako efikasnog napajanja. Pri radu u smanjenom tlaku (5 - 20kPa) u smjesi  $N_2/He/CO_2/CO$  (60/28/8/4) izboj djeluje sasvim homogeno. S obzirom na to da ne postoji dovoljno vremena za uklanjanje preostalih iona između valova, plazma djeluje kao omsko opterećenje s modulirajućom vodljivošću. Performansa lasera optimizirana je odabirom širine pukotine između elektroda od 4 -5 mm i korištenjem neobično visokog udjela dušika. Snažan poprečni tok plina pri brzini od 50- 80 m/s pruža izboju stabilnost i hlađenje. Izlazna snaga doseže vrijednost od 5 - 20 kW. Efikasnost u  $TM_{00}^4$  modu

---

<sup>4</sup>Transverse magnetic (TM) modovi: u smjeru širenja nema magnetnog polja. Ovi modovi ponekad se nazivaju i  $E$  modovi jer u smjeru širenja postoji samo električno polje. U kvadratnim valovodima,

je oko 10%. U roku od par godina ova vrsta lasera zauzela je važan tržišni udio u Japanu. Nedavno je predložen rad lasera pomoću izboja s dielektričnom barijerom pri 600kHz.

#### **4.6 Plazma u medicini**

Izboj s dielektričnom barijerom je tip plazme koji ograničava struju koristeći dielektrik koji prekriva jednu ili obje elektrode. Tipičan uređaj s izbojem s dielektričnom barijerom sastoji se od dvije planarne elektrode od kojih je bar jedna prekrivena s dielektričnim materijalom. Elektrode su razdvojene procjepom. Izboj s dielektričnom barijerom pokreće visok izmjenični napon frekvencije nekoliko desetaka kHz. Međutim, za medicinsku primjenu izboja s dielektričnom barijerom, ljudsko tijelo može poslužiti kao jedna od dvije elektrode, te na taj način omogućava osmišljanje uređaja za stvaranje plazme koji se sastoje samo od jedne elektrode prekrivene dielektrikom poput aluminijevog oksida ili kvarca [9]. Trenutno se istražuje korištenje izboja s dielektričnom barijerom u svrhu deaktivacije bakterija, tretman kožnih bolesti i rana, tretmane tumora i dezinfekciju površine kože. Tretman se obično obavlja na zraku prostorije te ga generalno pokreće prednapon od nekoliko kilovolti koristeći izmjeničan ili pulsirajući izvor struje.

---

brojevi moda određeni su s dva sufiksna broja pridružena tipu moda npr.  $TE_{mn}$  ili  $TM_{mn}$ , gdje je m broj poluvalnog uzorka preko širine valovoda, a n broj poluvalnog uzorka preko visine valovoda.

## 5 Demonstracijski eksperiment

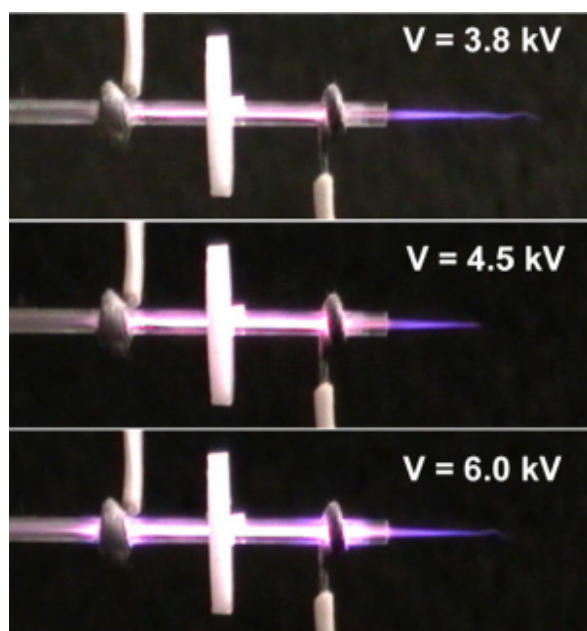
Uporaba izboja s dielektričnom barijerom pri atmosferskom tlaku je široko rasprostranjena u raznim područjima znanosti te u različitim primjenama. Zbog svoje stabilnosti idealan je za izvođenje mjerenja tijekom dugog perioda kako bi se istraživali mehanizmi ionizacije i pobude sustava plemenitih plinova pri atmosferskom tlaku. Razna teorijska istraživanja veliku su važnost davala nečistoćama u ovakvoj vrsti izboja, a posebno primjesama dušika  $N_2$  [6]. Eksperimentalni pristup ovom problemu pokazuje da je dušik glavni izvor pozitivnih iona u izboju s dielektričnom barijerom u heliju pri atmosferskom tlaku. Ovi ioni stvaraju se preko Penningove ionizacije metastabilnog atoma helija  $He^M$  s dušikom  $N_2$  iz čega dolazi dušikov ion  $N_2^+$  i elektron  $e^-$ . Proces je ilustriran na slici 5.1. Prirodna prisutnost dušika u izboju s helijem je prednost za lak rad DBD-a jer je izbor iona uvijek prisutan, no s druge strane usporedba sustava s nečistoćama i sustava bez nečistoća je iznimno teška [16].



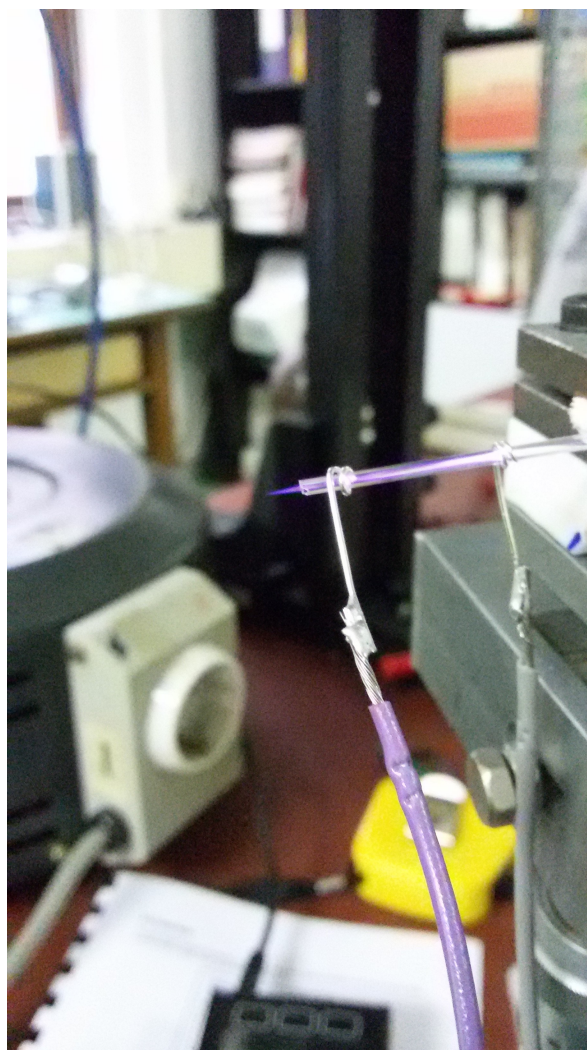
Slika 5.1: Penningova ionizacija metastabilnog atoma helija  $He^M$  s dušikom  $N_2$ .

Za proučavanje ove pojave koriste se kapilarni izboj s dielektričnom barijerom (Slika 5.3). Pokazalo se da primijenjeni napon dovodi do različitih modova izboja (Slika 5.2).

Slika 5.4 pokazuje eksperimentalni postav. Do izboja s dielektričnom barijerom dolazi u 30mm dugoj staklenoj kapilari vanjskog promjera 1.0 mm, a unutarnjeg 500  $\mu$  m. Na jednom kraju kapilare spojen je dovod plina, a drugi je otvoren. Dvije elektrode širine 1mm nalaze se na kapilari razmaknute za 10 mm. Udaljenost otvora



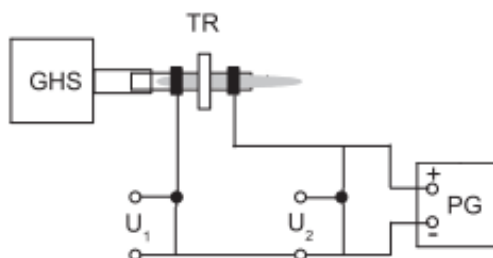
Slika 5.2: Izboj s dielektričnom barijerom pri različitim vrijednostima napona



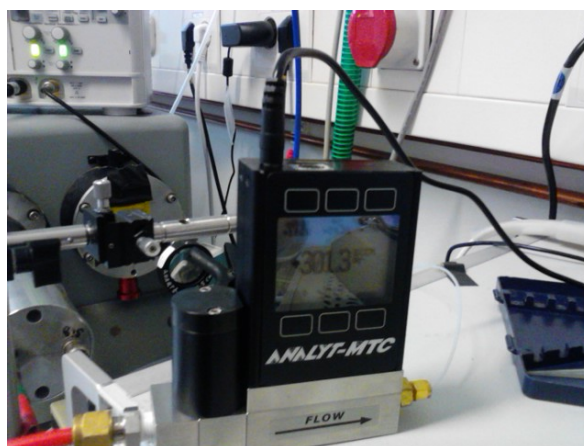
Slika 5.3: Izboj s dielektričnom barijerom s helijem u kapilari



kapilare do prve elektrode (anode) je približno 2mm. Za izboj se koristio helij čija je brzina toka  $300 \text{ cm}^3/\text{s}$  (Slika 5.5) povezan na napon od 3.5 kV (Slika 5.6) (frekvencija: 20 kHz).



Slika 5.4: Eksperimentalni postav: GHS (eng. gas- handling system) - plinski postav i dovod plina, PG (eng. plasma generator) - generator plazme

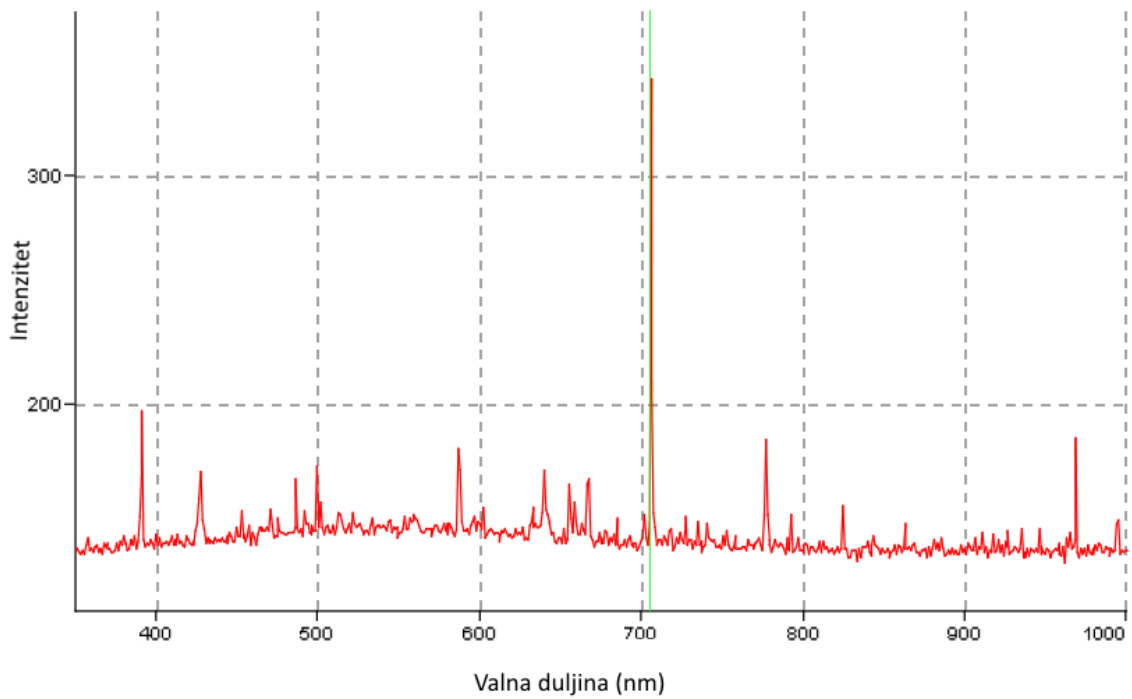


Slika 5.5: Kontroler konstantnog protoka plina

Iz eksperimenta se pokazalo da povećani tok plina i povećanje napona nemaju utjecaja na ionizaciju [8]. Kako bi dobili bolji uvid u bitne procese, promatrali smo prostornu raspodjelu pobuđenih atoma helija i dušika  $N_2$  te ione dušika  $N_2^+$  pomoću mjerenja odgovarajućeg intenziteta emisije uzduž osi izboja. Za pobuđene atome helija postoji šest jakih linija (na 388, 501, 587, 667, 706 i 728 nm) u vidljivom i UV dijelu spektra (Slika 5.7). Linije odgovaraju prelasku iz višeg pobuđenog stanja u  $2p \ ^1P_1^0$  rezonantno stanje ili u niže  $2p^3P_0^{2,1,0}$ , te u metastabilna  $2s \ ^1S_0$  i u  $2s \ ^3S_1$  stanja [17]. Na slici 5.7 vidimo da maksimalni intenzitet ima linija helija na 706 nm.



Slika 5.6: Izvor visokog napona i visoke frekvencije



Slika 5.7: Prostorna raspodjela pobuđenih atoma helija  $N_2$  i dušika te iona dušika  $N_2^+$

## 6 Metodički dio

Tijekom planiranja nastave fizike tražimo oblik nastave koji će razvijati razumijevanje fizike kroz kombiniranje znanja i znanstvenog razmišljanja i zaključivanja, te ujedno odražavati istraživački karakter fizike kao znanstvene discipline. Želimo u učenicima potaknuti smislenije i dublje učenje od pukog memoriranja. Alternativa tradicionalom tipu nastave, koji ne traži aktivno sudjelovanje u nastavi, je interaktivna i istraživački usmjerena nastava. Kako bismo uključili učenike u nastavu možemo koristiti interaktivne metode poput razredne rasprave, konceptualna pitanja s karticama, rješavanje zadataka u manjim grupama, interaktivno izvođenje pokusa i računalne interaktivne metode. Kako bi vođeno istraživanje bilo uspješno, nastavnik mora usmjeravati učenike, no omogućiti im i dovoljno prostora za samostalno traženje odgovora, za formuliranje i testiranje hipoteza, osmišljanje i provođenje pokusa te argumentiranje. Sat istraživački usmjerene nastave sastoji se od uvodnog, središnjeg i završnog dijela sata. Tijekom uvodnog dijela sata učenici se kroz pitanje ili problem uvode u temu kako bi se kroz povezivanje s osobnim iskustvom motivirali za sudjelovanje. Središnji dio sata započinje istraživačkim pitanjem. Učenici iznose svoje pretpostavke prije eksperimenta, a nakon eksperimenta iznose svoja opažanja, skiciraju pokus, te izvedu zaključke. Funkcija istraživanja je postizanje intelektualnog angažmana učenika i razvijanje znanstvenog razmišljanja i zaključivanja. U ovom dijelu sata učenici razvijaju brojne sposobnosti. Ova tema obrađuje se u drugom razredu srednje škole u sklopu nastavne cjeline *Električni naboj i električna sila*. Tijekom središnjeg dijela sata učenici će istraživati međuovisnosti varijabli koje utječu na promatranu pojavu. Ovdje imamo priliku kod učenika razvijati hipotetičko-deduktivno zaključivanje koje je osnovni oblik zaključivanja u znanosti. Nakon postavljanja istraživačkog pitanja, učenici će formirati neke hipoteze te osmisлити pokus kojim bi testirali svoju hipotezu. Prije izvođenja pokusa, učenici će predvidjeti ishod pokusa koji bi potvrdio hipotezu te na temelju opažanja i rezultata mjerenja u razrednoj diskusiji evaluirati ispravnost hipoteze. Ako dobijemo predviđeni ishod pokusa, možemo zaključiti da je hipoteza podržana. U završnom dijelu sata potrebno je provjeriti razumijevanje novostečenog znanja. Učeniku se na ovaj način pruža prilika za evaluiranje novog znanja te moguće primjene. Uloga nastavnika, pri ovakvom tipu nastave, nije prenošenje znanja već je izgrađivanje učeničkog znanja kroz vođenje

učenika u razmišljanju i zaključivanju kroz pokuse, pitanja i diskusiju. [13]

## **6.1 Priprema za nastavni sat: Kapacitet kondenzatora**

Nastavna priprema napisana je za nastavnu jedinicu *Kapacitet kondenzatora*. Navedena nastavna jedinica trajala bi dva školska sata i nastavnik je ima priliku provesti u drugim razredima gimnazija koje provode opći, prirodoslovni i prirodoslovno – matematički program.

*Obrazovni ishodi:*

Nakon održane nastave, učenici će moći:

- opisati i objasniti značenje kapaciteta
- opisati riječima o čemu ovisi kapacitet pločastog kondenzatora
- opisati matematički o čemu ovisi kapacitet pločastog kondenzatora
- navesti mjernu jedinicu za kapacitet

Tijekom sata će razvijati sposobnosti:

- logičkog razmišljanja
- istraživanja
- znanstvenog zaključivanja
- promatranja i opažanja
- usmenog i pismenog izražavanja

*Odgojni ishodi:*

Vrijednosti koje će učenici usvajati tijekom sata su:

- izražavanje vlastitog mišljenja
- uvažavanje tuđeg mišljenja i zaključivanja
- aktivno sudjelovanje u raspravi
- poticanje radoznalosti i motivacije za učenje
- poticanje kritičkog mišljenja, iznošenje stajališta.

### 6.1.1 Uvodni dio

#### Pokus 1

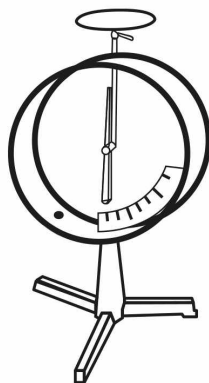
Na elektroskop stavimo ploču te ga nabijemo. Nabijenoj ploči kondenzatora primaknemo ruku. Učenike pitam što su opazili. Otklon kazaljke se smanjio na elektroskopu.

- **Zašto se to dogodilo? Što zapravo pokazuje kazaljka elektroskopa?**

Učenici iznose svoje pretpostavke.

Žicom spojimo kućište i ploču elektroskopa i nabijamo.

Učenike pitam za njihova opažanja. Vidimo da nema otklona kazaljke elektroskopa, no znamo da ima naboja. Kad su spojeni, kućište i ploča su na istom potencijalu, pa je napon među njima nula.



Slika 6.1: Postav pokusa 1

**Zaključak:** Elektroskop pokazuje napon između ploče i kućišta. Kako je napon proporcionalan naboju, uz uzemljeno kućište otklon kazaljke je proporcionalan naboju. Nabijamo ploču elektroskopa s uzemljenim kućištem i promatramo otklon. Učenici primjećuju da pri većem naboju imamo i veći napon.

- **O čemu ovisi naboj kondenzatora?**

Naboj kondenzatora proporcionalan je primijenjenom naponu  $U$ .

Na ploču pišem formulu:

$$Q = CU \quad (6.1)$$

Gdje  $C$  označava koeficijent proporcionalnosti koji nazivamo kapacitetom kondenzatora. Svaki kondenzator karakterizira određena vrijednost kapaciteta.

Iz jednadžbe izrazimo kapacitet:

$$C = \frac{Q}{U} \quad (6.2)$$

Uvodim jedinicu kapaciteta: određena je kvocijentom jedinice naboja i jedinice napona. Ta se jedinica zove farad u čast Michaela Faradaya. Na ploču zapisujem:

$$F = \frac{C}{V} \quad (6.3)$$

Na ploču zapisujem simbol kondenzatora:



Slika 6.2: Simbol kondenzatora

Primaknemo ruku nabijenom kondenzatoru promatramo otklon. Učenici primjećuju da pri istom naboju imamo manji napon.

- **Što možemo zaključiti o kapacitetu  $C$  sustava dviju ploča u usporedbi s jednom?**

Učenici zaključuju da je kapacitet  $C$  sustava dviju ploča veći u usporedbi s jednim. Ovdje uvodim pojam pločastog kondenzatora.

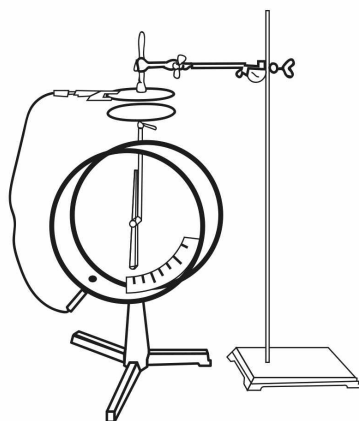
### 6.1.2 Središnji dio

#### Pokus 2:

Na elektroskop stavimo jednu, a na stalak drugu metalnu ploču. Ploču sa stalka spojimo na kućište elektroskopa. Razmak među pločama je 2 – 3 cm. [14]

- **Što će se dogoditi ako pomoću polivinilnog štapa nabijemo metalnu ploču na elektroskopu?**

Učenici iznose svoja razmišljanja. Zaključuju da će se kazaljka osciloskopa otkloniti. Pomoću polivinilnog štapa nabijemo metalnu ploču na elektroskopu.



Slika 6.3: Postav pokusa 2 [14].

- **Što pokazuje otklon kazaljke elektroskopa?**

Otklon pokazuje napon između ploča kondenzatora.

**Istraživačko pitanje: O čemu ovisi kapacitet pločastog kondenzatora?**

- **Kako bi mogli provjeriti o čemu ovisi kapacitet pločastog kondenzatora?**

O kojim varijablama bi mogao ovisiti kapacitet pločastog kondenzatora? Kako bi mogli ispitati ovisnost kapaciteta o njima?

Preko rasprave učenici dolaze kako je važna kontrola varijabli – dok mjerimo ovisnost kapaciteta o jednoj varijabli, ostale moramo držati konstantnima.

Učenici iznose svoje prijedloge te predlažu moguće pokuse. Nakon slušanja prijedloga učenika nastavljamo s pokusima.

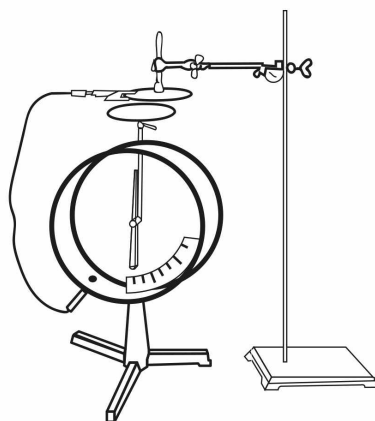
**Pokus 3:**

- **Što će se dogoditi s kapacitetom kondenzatora ako smanjimo površinu ploča kondenzatora ?**

Učenici zapisuju svoje hipoteze, a nekoliko učenika ih čita naglas. Biramo jednu hipotezu te ju zapisujemo na ploču. [14]

**Hipoteza 1:** Kapacitet će se smanjiti, ako smanjimo površinu ploča.

**Test:** Ne mijenjajući razmak između ploča kondenzatora, pomaknemo gornju ploču kondenzatora u stranu tako da se smanji površina kojom se ploče međusobno prekrivaju.



Slika 6.4: Postav pokusa 3.

**Predviđanje:** Otklon kazaljke elektroskopa će se smanjiti

Nakon izvođenja pokusa, učenici zapisuju svoja opažanja te crtaju skicu pokusa.

**Opažanje:** Otklon kazaljke elektroskopa se povećao.

**Zaključak:** Hipoteza 1 nije podržana. Smanjenjem površine smanji se kapacitet pločastog kondenzatora.

Ako smanjimo površinu između ploča kondenzatora otklon kazaljke elektroskopa se povećao- napon između ploča kondenzatora se povećao- kapacitet pločastog kondenzatora se smanjio.

- **U kakvom su odnosu kapacitet i površina među pločama kondenzatora?**

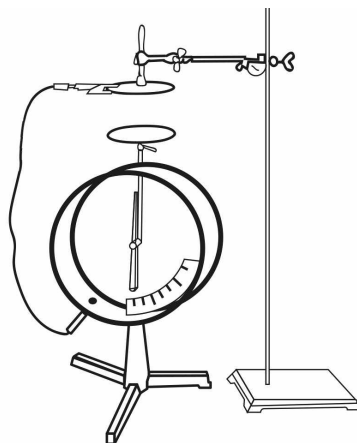
Kada smo smanjili površinu među pločama kondenzatora, smanjio se i kapacitet. Ne znamo koliko puta da bismo zaključili o proporcionalnosti. Drugi znanstvenici su mjerili i utvrdili proporcionalnost kapaciteta  $C$  i površine ploča kondenzatora  $A$ .

#### **Pokus 4:**

- **Što će se dogoditi s naponom između ploča kondenzatora ako gornju ploču kondenzatora udaljimo od donje nabijene ploče?**

Učenici zapisuju svoje hipoteze, a nekoliko učenika ih čita naglas. Biramo jednu hipotezu te ju zapisujemo na ploču. [14]





Slika 6.5: Postav pokusa 4.

**Hipoteza 2:** Kapacitet će se smanjiti, ako povećamo udaljenost među pločama kondenzatora.

**Test:** Gornju ploču kondenzatora udaljimo od donje nabijene ploče.

**Predviđanje:** Otklon kazaljke elektroskopa će se povećati ako povećamo udaljenost među pločama kondenzatora.

Nakon izvođenja pokusa, učenici zapisuju svoja opažanja te crtaju skicu pokusa.

**Opazanje:** Kada smo gornju ploču kondenzatora udaljili od donje nabijene ploče otklon kazaljke elektroskopa se povećao.

**Zaključak:** Hipoteza 2 je podržana. Povećanjem udaljenosti među pločama kondenzatora smanjio se kapacitet kondenzatora.

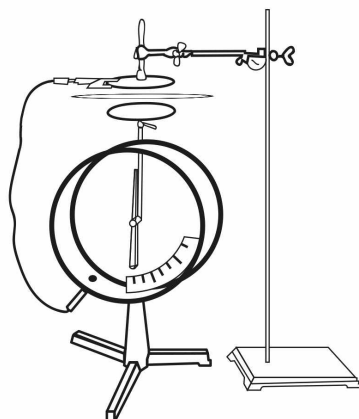
Ako povećamo udaljenost između ploča kondenzatora otklon kazaljke elektroskopa se povećao- napon između ploča kondenzatora se povećao- kapacitet pločastog kondenzatora se smanjio.

- **U kakvom su odnosu kapacitet i udaljenost između ploča kondenzatora?**  
Kapacitet se smanjuje ako se udaljenost između ploča kondenzatora povećava. Ne znamo koliko puta da bismo zaključili o proporcionalnosti. Drugi znanstvenici su mjerili i utvrdili kako su kapacitet i udaljenost između ploča  $d$  obrnuto proporcionalne veličine.

### Pokus 5:

- Što će se dogoditi s naponom između ploča kondenzatora ako između ploča nabijenog kondenzatora umetnemo plastičnu ploču?

Učenici zapisuju svoje hipoteze, a nekoliko učenika ih čita naglas. Biramo jednu hipotezu te ju zapisujemo na ploču. [14]



Slika 6.6: Postav pokusa 5.

**Hipoteza 3:** Kapacitet će se povećati, ako umetnemo plastičnu ploču između ploča kondenzatora.

**Test:** Između ploča nabijenog kondenzatora umetnemo plastičnu ploču i promatramo što se događa s otklonom kazaljke elektroskopa.

**Predviđanje:** Otkon kazaljke elektroskopa će se smanjiti.

Nakon izvođenja pokusa, učenici zapisuju svoja opažanja te crtaju skicu pokusa.

**Opazanje:** Otklon kazaljke elektroskopa se smanji kada između ploča nabijenog kondenzatora umetnemo plastičnu ploču.

**Zaključak:** Hipoteza 3 je podržana. Ako između ploča kondenzatora umetnemo plastičnu ploču kapacitet kondenzatora će se povećati.

Određeni dielektrik povećava kapacitet kondenzatora za faktor  $\epsilon_e$ , koji se zove relativna permitivnost tog dielektrika. Faktor  $\epsilon_r$  je čisti broj koji pokazuje koliko je puta permitivnost konkretnog materijala (dielektrika) veća od permitivnosti

vakuuma  $\epsilon_0$ . Na ploču zapisujem:

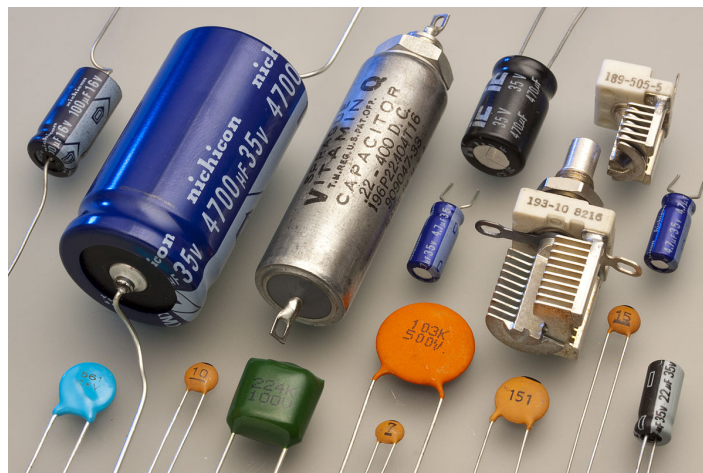
$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r \quad (6.4)$$

Kroz raspravu ponavljamo do kojih smo zaključaka došli. Kapacitet pločastog kondenzatora proporcionalan je površini ploča  $A$ , a obrnuto proporcionalan udaljenosti između ploča  $d$ . On ovisi i o sredstvu koje se nalazi između ploča: proporcionalan je električnoj permitivnosti tog sredstva.

Učenici u svoje bilježnice zapisuju matematički zapis, a jedan učenik dolazi napisati na ploču:

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (6.5)$$

Učenike pitam što nam ovaj izraz govori te kako bi postigli što veći kapacitet. Kroz raspravu učenici dolaze do zaključka da kondenzator većeg kapaciteta možemo dobiti povećanjem površine ploče, smanjenjem razmaka između ploča i stavljanjem dielektrika između ploča. Učenicima pomoću projektora pokazujem slike stvarnih kondenzatora:



Slika 6.7: Primjeri stvarnih kondenzatora [15]

Kondenzatori se koriste za pohranu električne energije, u raznim uređajima poput televizije i radija, ...

### 6.1.3 Završni dio

Konceptualna pitanja prikazujem pomoću prezentacije na projektoru, a učenici odgovaraju podizanjem kartica. Nekoliko učenika objašnjava svoje odgovore, te kroz raspravu dolazimo do točnog odgovora.

#### Pitanje 1:

- **Kondenzator se sastoji od dvije paralelne ploče razmaknute za  $d$ . Kondenzator nabijemo nabojem  $Q$ . Ploče razmičemo tako da se  $d$  povećava. Što se pri tome događa s kapacitetom kondenzatora?**
  - a) Kapacitet kondenzatora se smanjuje.
  - b) Kapacitet kondenzatora se povećava.

Učenici podižu kartice i daju obrazloženje za svoje odgovore. Prisjećamo se pokusa sa sata te zaključujemo da se kapacitet kondenzatora  $C$  smanjuje jer su razmak između ploča  $d$  i kapacitet kondenzatora  $C$  obrnuto proporcionalne veličine.

#### Pitanje 2:

- **Dvije paralelne ploče površine  $A$ , razmaknute za  $d$  imaju u vakuumu kapacitet  $C$ . Ako između i oko ploča ulijemo ulje relativne permitivnosti  $\epsilon_r = 4$  kapacitet tog kondenzatora ostat će isti kao i prije ako:**
  - a) povećamo površinu ploča na  $4A$ .
  - b) povećamo razmak između ploča na  $4d$ .
  - c) smanjimo razmak između ploča na  $d/2$ .
  - d) smanjimo površinu ploča na  $A/2$ .
  - e) smanjimo razmak između ploča na  $d/4$ .

Učenici podižu kartice i nekoliko učenika daje obrazloženje za svoje odgovore. Kako bi kapacitet kondenzatora  $C$  ostao nepromijenjen, moramo povećati razmak između ploča na  $4d$ .

Nakon provjere razumijevanja konceptualnim pitanjima, učenici će rješavati zadatke prikazane na prezentaciji u manjim skupinama od 3-4 člana.

### Zadatak 1:

- Pločasti kondenzator priključen je na izvor napona od 1000V i pritom je naboj na kondenzatoru jednak  $10^{-5}$  C. Koliki je kapacitet tog kondenzatora?

Primjenom formule 6.2 dobit ćemo:

$$C = \frac{10^{-5}C}{10^3V}$$
$$C = 10^{-11}F = 10 \cdot 10^{-12}, C = 10pF$$

### Zadatak 2:

- Ako je razmak između ploča ravnog kondenzatora 2 mm, kolika bi trebala biti površina A ploča da bi kapacitet tog kondenzatora bio 1 F?

Iz formule 6.1.2 dobivamo:

$$A = \frac{Cd}{\epsilon_0} = \frac{1F \cdot 2 \cdot 10^{-3}m}{8,854 \cdot 10^{-12}Fm^{-1}} = 2,2 \cdot 10^8 m^2$$

Nakon evaluacije ovog rezultata vidimo da bi površina ploča kondenzatora čiji je kapacitet  $C = 1F$  morala biti jako velika :  $22km \times 10 km$  .

## 7 Zaključak

Werner von Siemens je 1857. započeo eksperimentalna istraživanja fokusirana na stvaranje ozona. Industrijska primjena je od tada znatno napredovala i povećala svoje značenje na tržištu. Korištenje moderne dijagnostike, osim razumijevanja kemijskih i fizikalnih procesa plazme u ozonizatorima, dovelo je do mnogobrojnih dodatnih primjena ove vrste izboja. Moguća je primjena DBD-a u svrhu kontrole plinovitih zagađivača te za uništavanje otrovnih spojeva. Cilj je pretvoriti otrovne spojeve u bezopasne ili manje otrovne tvari. Osim stvaranja ozona i pročišćavanja zraka, DBD se koristi za modifikaciju površinskih svojstava plastičnih i drugih polimernih materijala, u medicini plazme u svrhu deaktivacije bakterija, tretmane kožnih bolesti i rana, u CO<sub>2</sub> laserima te u plazma ekranima. Daljnji napredak očekuje se od korištenja dielektrika s posebnim svojstvima i od boljeg razumijevanja površinskih izboja koji predstavljaju sastavni dio svih izboja s dielektričnom barijerom.

## Bibliography

- [1] Anders A., Tracking Down the Origin of Arc Plasma Science. I. Early Pulsed and Oscillating Discharges // IEEE Transactions on Plasma Science. Vol. 31, No. 5, October 2003
- [2] Treumann, R. A. ; Kłos, Z. ; Parrot, M. Physics of electric discharges in atmospheric gases: an informal introduction //Space Physics. , April 2008
- [3] Dumanić, E. Optogalvanska spektroskopija izboja u neonu. Diplomski rad. Zagreb : Prirodoslovno-matematički fakultet, 1999.
- [4] Kogelschatz, U. Dielectric-barrier Discharges : Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications // Plasma Chemistry and Plasma Processing. Vol. 23, No.1, March 2003
- [5] The displacement current, (02.02.2006), Richard Fitzpatrick, <http://farside.ph.utexas.edu/teaching/em/lectures/node46.html>, 12.7.2018.
- [6] Klute, F. D. ; Michels, A. ; Vadla, C. ; Veža, D. ; Horvatic, V. ; Franzke, J. ,Experimental study on the influence of trace impurities on the ionization of atmospheric noble gas dielectric barrier discharges // August 2016
- [7] Mangolini, L. , Experimental study of Atmospheric Pressure Glow Discharges controlled by Dielectric Barrier //Plasma Physics.
- [8] Müller, S.; Krähling, T. ; Vadla, C. ; Veža, D. ; Horvatic, V. ; Franzke, J. ,Operation modes of the helium dielectric barrier discharge for soft ionisation //Spectrochimica Acta, part B, 85, September 2012
- [9] Weltmann, K. ; Woedtke, T. , Plasma medicine—current state of research and medical application // Plasma Physics and Controlled Fusion, Vol. 59, No. 1, November 2016
- [10] Paar, V.; Šips, V. Fizika 2: udžbenik za drugi razred gimnazije, Zagreb: Školska knjiga, 2009.
- [11] Krsnik, R. Fizika 2: udžbenik za 2. razred gimnazije, B inačica programa, Zagreb: Školska knjiga, 1997.

- [12] Brković, N. Zbirka zadataka iz fizike, drugi dio, Zagreb: Luk, 2001.
- [13] Planinić, M. Predavanja iz Metodike nastave fizike 1, Zagreb: PMF, 2018.
- [14] Planinić, M. Praktikum iz eksperimentalne nastave fizike 2, Zagreb: PMF, 2017.
- [15] Real-world circuit elements, (20.10.2014), Khan Academy, <https://www.khanacademy.org/science/electrical-engineering/ee-circuit-analysis-topic/circuit-elements/a/ee-real-world-circuit-elements>, 3.9.2018.
- [16] Horvatic, V.; Mueller, S; Veza, D., Atmospheric helium capillary dielectric barrier discharge for soft ionization: broadening of spectral lines, gas temperature and electron number density //Journal of Analytical Atomic Spectrometry. Vol. 29, No.3, March 2014
- [17] Horvatic, V.; Mueller, S; Veza, D., Atmospheric helium capillary dielectric barrier discharge for soft ionization: Determination of Atom Number Densities in the Lowest Excited and Metastable States//Analytical Chemistry. Vol. 89, No.1, January 2014
- [18] Yagi, S.; Kuzumoto, M., Silent discharges in ozonisers and CO<sub>2</sub> lasers // Australian Journal of Physics, vol. 48, No. 3, August 1995
- [19] Harries, W. L.; von Engel, A., Influence of Irradiation on the Low Frequency Electrodeless Discharge in Chlorine // The Journal of Chemical Physics, 19, 514 (1951)
- [20] Dorai, R. Modeling of plasma remediation of NO<sub>x</sub> using global kinetic models accounting for hydrocarbons. MS Thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign, 1999.
- [21] Traus, I.; Suhr, H; Hydrogen sulfide dissociation in ozonizer discharges and operation of ozonizers at elevated temperatures //Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol 12, No. 3, September 1992
- [22] Clothiaux, E.J.; Koropchak, J. A.; Moore, R. R.; Decomposition of an organophosphorus material in a silent electrical discharge//Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol 4, No.1, March 1984